



Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica

**Optimización del proceso de recocido de
recristalización para obtener en aceros libres de
intersticios calidad de embutición profunda**

Jairo Alfonso Gómez Rodríguez

Tesis presentada para optar el grado de Magister en Ingeniería
Mecánica por la Fundación Universidad del Norte

Dirigida por:
Jaime Torres Ph D

Julio 2012

*A Mi Dios:
A quien dedico y doy gracias cada día de mi vida*

*A mi esposa adorada Claudia Maria:
Por su amor, apoyo y comprensión*

*A mis hermosas Marías:
La luz que iluminan mi vida y fortalecen mi espíritu*

*A mis padres, Alfonso y Carmen:
Por sus consejos y motivación*

*A mis hermanos y sobrinos:
A quienes quiero*

A toda mi gente, A mi familia, gracias

Agradecimientos

A través de estas líneas quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la empresa Acerías de Colombia, a sus directivas y en especial a Carlos Arturo, Manuel y Juan Alberto, quienes con mucho entusiasmo apoyaron decididamente el deseo de preparación y de obtención de este logro.

A mis profesores a quienes dedico y doy un inmenso reconocimiento por sus aportes en mi proceso de formación, por su entusiasmo y por sobre todo, su profesionalismo, a ellos un abrazo muy respetuoso en especial a Jaime Torres, Jose Wilches, Heriberto Maury, Jairo y por supuesto Marco Sanjuan.

A las Ingenieras Alejandra Caballero y Diana Mantilla, por su apoyo y por su infatigable y generosa ayuda.

A mis compañeros de trabajo: Enrique, Marcos, Luis, Oscar, Alonso, Antonio, Samuel, Onofre y Cesar, su labor profesional y crítica, en cada registro, en cada ensayo, en cada detalle, en cada actividad, son hoy el resultado de este anhelado logro, a ustedes muchas gracias.

A mis compañeros de Maestría, con quienes pasamos largos momentos de estudio.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION.....	1
1.1.	ANTECEDENTES.....	1
1.2.	PLANTEAMIENTO DE LA PREGUNTA O PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN.....	1
1.3.	OBJETIVOS.....	5
1.3.1	Objetivo general.....	5
1.3.2	Objetivos específicos.....	5
2.	MARCO TEORICO.....	7
2.1.	ACEROS LIBRES DE INTERSTICIOS “ IF steel “.....	7
2.2.	RECOCIDO.....	13
2.3.	RECOCIDO INDUSTRIAL.....	17
2.4.	TEMPLE.....	23
2.5.	ENSAYOS Y NORMAS PARA CLASIFICAR UN ACERO CON CALIDAD DE EMBUTICIÓN.....	25
2.5.1.	Propiedades mecánicas.....	26
2.5.2.	Anisotropía.....	28
2.5.3.	Endurecimiento por deformación.....	34
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	36
3.1.	DISEÑO Y EJECUCION DE RECOCIDO PARA ACERO IF.....	36
3.1.1.	Estudio de curvas de recocido y propiedades para Calidad Comercial..	36
3.1.2.	Selección del material IF.....	38
3.1.3.	Preparación del material IF para el recocido.....	39
3.1.4.	Ejecución del tratamiento térmico de recocido para el material IF.....	40
3.2.	CARACTERIZACIÓN DEL ACERO IF RECOCIDO Y TEMPLADO Y EL ACERO SAE 1006 DDQ.....	41
3.3.	DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA ACEROS LIBRES DE INTERSTICIOS RECOCIDOS EN CAMPANA 100 % HIDROGENO.....	43
4.	ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
4.1.	RECOCIDO DE PRUEBA DE ACERO IF.....	46
4.2.	CARACTERIZACION DE ACERO IF DE PRUEBA Y SAE 1006 DDQ.....	48
4.2.1.	Determinación de los índices de anisotropía plástica “r” y anisotropía planar Δr	49
4.2.2.	Determinación del índice de endurecimiento por deformación exponente n.....	57
4.2.3.	Determinación de las propiedades mecánicas.....	63
4.2.4.	Análisis Metalográfico.....	66
4.3.	DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA RECOCIDOS EN CAMPANA 100 % HIDROGENO DE ACEROS LIBRES DE INTERSTICIOS.....	70
4.3.1.	Primera corrida de aceros IF.....	70
4.3.1.1.	Recocido a temperatura de 680°C para la carga de 83.525 kg.....	72
4.3.1.2.	Propiedades mecánicas obtenidas del recocido a temperatura de 680°C para la carga de 83.525 kg.....	74
4.3.1.3.	Recocido a temperatura de 690°C para la carga de 84.045 kg.....	76

4.3.1.4.	Propiedades mecánicas obtenidas del recocido a temperatura de 690°C para la carga de 84.045 kg.....	76
4.3.1.5.	Recocido a temperatura de 700°C para la carga de 83.425 kg.....	78
4.3.1.6.	Propiedades mecánicas obtenidas del recocido a temperatura de 700°C para la carga de 83.425 kg.....	79
4.3.1.7.	Propiedades mecánicas obtenidas de la primera corrida de aceros IF después del temple.....	81
4.3.2.	Segunda corrida de aceros IF.....	85
4.3.2.1.	Recocido a temperatura de 680°C para la carga de 57.925 kg.....	86
4.3.2.2.	Recocido a temperatura de 690°C para la carga de 60.110 kg.....	86
4.3.2.3.	Recocido a temperatura de 700°C para la carga de 59.415 kg.....	87
4.4.	CLASIFICACION DE ACEROS LIBRES DE INTERSTICIOS Y ANALISIS DE VARIANZA.....	90
4.4.1.	Clasificación de las propiedades mecánicas.....	90
4.4.2.	Análisis de Varianza.....	94
4.4.2.1.	Análisis de Varianza para el tipo de acero.....	95
4.4.2.2.	Análisis de Varianza para la temperatura de recristalización.....	99
4.4.3.	Proyección del tiempo de calentamiento en función de la carga.....	105
5.	CONCLUSIONES.....	107
6.	RECOMENDACIONES.....	109

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Protocolo del recocido de prueba con material IF para buscar calidad de embutición y del recocido que por registros históricos se hace en ACESCO para acero SAE 1006 calidad comercial.....	37
Tabla 2. Protocolo del recocido de prueba con material IF para buscar calidad de embutición y del recocido que por registros históricos se hace en ACESCO para acero SAE 1006 calidad comercial.....	37
Tabla 4. Composición química de los rollos de acero IF para la prueba.....	38
Tabla 3. Dimensiones y peso de los rollos de acero libre de intersticios que se escogió para la prueba de caracterización y valoración del recocido en campana para obtener aceros IF con calidad de embutición.....	38
Tabla 5. Cálculo de los elementos que definen el aleante estabilizador de acuerdo a Pradhan de los aceros IF de prueba.....	39
Tabla 6. Designación de letras para cada proceso por donde ha pasado el acero durante su transformación.....	41
Tabla 7. Composición química de rollos de acero SAE 1006 DDQ espesor 0.46 mm..	43
Tabla 8. Composición química de rollos de acero SAE 1006 DDQ espesor 0.61 mm..	43
Tabla 9. Información básica del diseño de experimentos.....	44
Tabla 10. Información básica del tratamiento de recocido de prueba con las propiedades mecánicas obtenidas en los aceros IF después de aplicar 2.44 % de reducción en el proceso de temple.....	48
Tabla 11. Índice de anisotropía plástica r calculado en los aceros IF de prueba, después de recocido y después de 2.44 % de temple.....	50
Tabla 12. Índice de anisotropía planar Δr calculado en los aceros IF de prueba, después de recocido y después de 2.44 % de temple.....	52
Tabla 13. Índice de anisotropía plástica y anisotropía planar Δr calculado para los aceros SAE 1006 de espesor 0.60 mm calidad DDQ.....	53
Tabla 14. Índice de anisotropía plástica y anisotropía planar Δr calculado para los aceros SAE 1006 de espesor 0.45 mm calidad DDQ.....	53
Tabla 15. Tabla comparativa del Índice de anisotropía plástica y anisotropía planar Δr calculado para los aceros de prueba IF y SAE 1006 de espesor 0.61 mm calidad DDQ.....	53

Tabla 16. Tabla comparativa del Índice de anisotropía planar Δr calculado para los aceros de prueba IF y SAE 1006 calidad DDQ de espesor 0.60 mm.....	54
Tabla 17. Tabla comparativa del Índice de endurecimiento por deformación n y la relación TS/YP antes y después de temple para los aceros IF sometidos al recocido de prueba.....	58
Tabla 18. Tabla comparativa del Índice de endurecimiento por deformación n y la relación TS/YP para los aceros SAE 1006 DDQ comercializados en la industria nacional.....	60
Tabla 19. Tabla comparativa del Índice de endurecimiento por deformación n y la relación TS/YP, para los aceros de prueba IF y SAE 1006 de espesor 0.61 mm calidad DDQ.....	61
Tabla 20. Tabla comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas para los aceros IF de prueba, después del recocido y del temple.....	64
Tabla 21. Tabla comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas para los aceros IF de prueba y SAE 1006 DDQ comercializados.....	65
Tabla 22. Información básica del diseño de experimentos.....	71
Tabla 23. Composición química de los aceros IF estabilizados con Ti usados en la primera corrida del diseño de experimentos.....	72
Tabla 24. Acero IF cargado en cada recocido de acuerdo al diseño de experimentos.....	73
Tabla 25. Tabla resumen de los tiempos y temperaturas más relevantes del recocido a 680°C para carga de 83.525 kg de Acero IF.....	74
Tabla 26. Tabla resumen de las propiedades mecánicas obtenidas antes del temple para el recocido a 680°C con peso de carga de 83.525 kg de Acero IF.....	75
Tabla 27. Tabla resumen de los tiempos y temperaturas más relevantes del recocido a 690°C para carga de 84.045 kg de Acero IF.....	76
Tabla 28. Tabla resumen de las propiedades mecánicas obtenidas antes del temple para el recocido a 690°C con peso de carga de 84.045 kg de Acero IF.....	77
Tabla 29. Tabla resumen de los tiempos y temperaturas más relevantes del recocido a 700°C para carga de 83.425 kg de Acero IF.....	78
Tabla 30. Tabla resumen de las propiedades mecánicas obtenidas antes del temple para el recocido a 700°C con peso de carga de 83.425 kg de Acero IF.....	79

Tabla 31. Tabla resumen de las propiedades mecánicas obtenidas después del temple para los recocidos de 680°C, 690°C y 700°C de Acero IF.....	82
Tabla 32. Tabla comparativa de las propiedades mecánicas con y sin temple para diferentes temperaturas de recocido de los aceros IF de la primera corrida.....	82
Tabla 33. Composición química de los aceros IF estabilizados con Ti usados en la segunda corrida.....	85
Tabla 34. Acero IF cargado en cada recocido de acuerdo al diseño de experimentos.	85
Tabla 35. Tabla resumen de los tiempos y temperaturas más relevantes del recocido a 680°C para carga de 57.925 kg de Acero IF.....	86
Tabla 36. Tabla resumen de los tiempos y temperaturas más relevantes del recocido a 690°C para carga de 60.110 kg de Acero IF.....	87
Tabla 37. Tabla resumen de los tiempos y temperaturas más relevantes del recocido a 700°C para carga de 59.415 kg de Acero IF.....	88
Tabla 38. Tabla resumen de las propiedades mecánicas obtenidas después del temple para la segunda corrida con cargas bajas para aceros IF.....	89
Tabla 39. Propiedades mecánicas obtenidas después del temple para el recocido de prueba a 690°C de la primera etapa de la investigación de los aceros IF.....	90
Tabla 40. Participación de las propiedades en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 del recocido de prueba a 690°C de la primera etapa de la investigación de los aceros IF.....	91
Tabla 41. Participación de las propiedades en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 del recocido de prueba a 690°C de la primera etapa de la investigación de los aceros IF.....	91
Tabla 42. Participación de los rollos de acero IF en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 del recocido de prueba a 690°C de la primera etapa de la investigación.....	91
Tabla 43. Propiedades mecánicas obtenidas después del temple para la primera corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.....	92
Tabla 44. Participación de las propiedades en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 de la primera corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.....	92
Tabla 45. Participación de las propiedades en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 de la primera corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.....	92

Tabla 46. Participación de los rollos de acero IF en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 de la primera corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.....	93
Tabla 47. Propiedades mecánicas obtenidas después del temple para la segunda corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.....	93
Tabla 48. Participación de las propiedades en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 de la segunda corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.....	94
Tabla 49. Participación de las propiedades en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 de la segunda corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.....	94
Tabla 50. Participación de los rollos de acero IF en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 de la segunda corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.....	94
Tabla 51. Tabulación de las propiedades mecánicas obtenidas en las caracterizaciones de los aceros IF y los aceros SAE 1006 calidad DDQ.....	96
Tabla 52. Tabulación de las propiedades mecánicas obtenidas sin el temple en la primera corrida a cargas entre 80.000 kg y 90.000 kg para las diferentes temperaturas de recristianización de los aceros IF estabilizados con Titanio.....	100
Tabla 53. Tabulación de las propiedades mecánicas obtenidas con el temple en la primera corrida a cargas entre 80.000 kg y 90.000 kg para las diferentes temperaturas de recristianización de los aceros IF estabilizados con Titanio.....	102
Tabla 54. Tabulación de las propiedades mecánicas obtenidas con el temple en la segunda corrida a cargas entre 50.000 kg y 60.000 kg para las diferentes temperaturas de recristianización de los aceros IF estabilizados con Titanio.....	102
Tabla 55. Tabulación de los tiempos y temperaturas encontrados durante los recocidos de recristalización realizados a aceros IF con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$	106
Tabla 56. Datos hallados por las ecuaciones, para diferentes niveles de carga utilizando los mismos gradientes de temperatura del acero.....	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. a) Átomos intersticiales en red cristalina de hierro, b) Elementos de embutición profunda fabricados con aceros IF.....	7
Figura 2. Etapas adicionales dentro del proceso de fabricación de acero, necesarias para reducir y eliminar los átomos intersticiales en solución sólida para obtener aceros libres de intersticios.....	8
Figura 3. Efecto del contenido de Titânio en exceso sobre la temperatura de recristalización de aceros libres de intersticios (Bleck, 1990) (Bibliografia, Efeito da Variação das Condições de Encharque nas Propriedades Mecânicas do Material IF Processado no Recozimento Contínuo da Usiminas, Rodrigo Rocha de Meira, Orientador: Prof. Ronaldo Barbosa 2006).....	9
Figura 4. Efecto del contenido de Ti en exceso sobre las propiedades mecânicas en aceros libres de intersticios estabilizados con Ti (Pradhan 1994) (Bibliografia, Efeito da Variação das Condições de Encharque nas Propriedades Mecânicas do Material IF Processado no Recozimento Contínuo da Usiminas, Rodrigo Rocha de Meira, Orientador: Prof. Ronaldo Barbosa 2006).....	10
Figura 5. Efecto del contenido de carbono sobre las propiedades mecânicas en aceros libres de intersticios estabilizados con Ti y Ti – Nb (Pradhan 1994) (Bibliografia, Efeito da Variação das Condições de Encharque nas Propriedades Mecânicas do Material IF Processado no Recozimento Contínuo da Usiminas, Rodrigo Rocha de Meira, Orientador: Prof. Ronaldo Barbosa 2006).....	11
Figura 6. Efecto de la temperatura de embobinado en caliente sobre la temperatura de recristalización, dependiendo del tipo de elemento estabilizador (Ti, Ti – Nb y Nb) (Bhattacharya 1989) (Bibliografia, Efeito da Variação das Condições de Encharque nas Propriedades Mecânicas do Material IF Processado no Recozimento Contínuo da Usiminas, Rodrigo Rocha de Meira, Orientador: Prof. Ronaldo Barbosa 2006).....	12
Figura 7. Deformación preferencial sobre la estructura granular y la alteración que se da en el punto de fluencia como consecuencia de la cantidad de deformación plástica permanente proveniente del proceso de trabajo en frío.....	13
Figura 8. Cambio de la estructura durante el tratamiento térmico de recocido en campana.....	14
Figura 9. Clasificación de aceros laminados en frío de acuerdo a la capacidad de deformación, realizada por la ASTM en el estándar A 1008.....	14
Figura 10. Variación de las propiedades mecânicas de acuerdo a la temperatura de recristalización y tiempo de sostenimiento.....	15

Figura 11. Efecto de la temperatura de recristalización y el tiempo de recocido sobre el tamaño de grano, la ductilidad y la fracción de recristalización en aceros SAE 1006 con 65 % de trabajo en frío. Estudio B. Soleimani Amiri y G. H. Akbari, Recrystallization Behavior of Deep Drawing Low Carbon Steel Sheets produced by Mobarakeh Steel Plate.....	16
Figura 12. Proceso industrial de Recocido en Campana para bobinas de acero.....	17
Figura 13. Equipos que constituyen el Recocido en Campana Industrial de la planta ACESCO para bobinas de acero.....	17
Figura 14. Diagrama esquemático del proceso de calentamiento de bobinas de acero en el recocido en campana, el cual muestra las líneas de flujo del gas reductor (H_2) en el interior de la campana cobertora y la ubicación de la termocupla que controla el proceso. Gráfica de manual técnico de EBNER.....	19
Figura 15. Perfil de instalación de termocuplas para definir ΔT en una carga de bobinas de acero sometidas al proceso de recocido en campana y la curva que registra la variación del gas con respecto a la temperatura del acero en el tiempo. ESTUDIO DEL PROCESO DE RECOCIDO EN CAMPANA (BATCH ANNEALING) PARA MEJORAR LA EMBUTIBILIDAD DE ACEROS DESTINADOS A ESTAÑAR Y/O CROMAR.....	20
Figura 16. Diagrama esquemático del proceso de enfriamiento de bobinas de acero en el recocido en campana, el cual muestra las líneas de flujo del gas reductor (H_2) en el interior de la campana cobertora y la ubicación de la termocupla que controla el proceso. Gráfica de manual técnico de EBNER.....	21
Figura 17. Secuencia del proceso industrial de Recocido en Campana para bobinas de acero laminado en frío. Gráfica de manual publicitario de EBNER.....	22
Figura 18. A la Izquierda, diagrama esquemático de un Temper Mill utilizado para templar el material después de ser recocido publicado por la U.S Steel en www.uss.com y a la derecha, la curva esfuerzo vs deformación para un acero IF de la investigación antes y después de temple, registros de ACESCO.....	23
Figura 19. Observación del fenómeno de bandas de Luders en aceros después de ser recocidos. A la Izquierda, secuencia de la deformación de un acero y aparición de las bandas de Luders sobre su superficie en forma de acostillamiento (LUDERS BAND FORMATION IN STEEL, Mike Meier, Aaron Broumas, Octubre 9 de 2001 Department of Chemical Engineering and Materials Science University of California) y a la derecha secuencia de formación del fenómeno en el YPE con la magnificación del defecto (ANALISE NUMERICA DE BANDAS DE LUDERS de Enrique Nogueira Santana)....	24
Figura 20. Representación esquemática de la elongación del punto de fluencia en un diagrama esfuerzo vs deformación. Improved Criteria for Acceptable Yield Point	

Elongation In Surface Critical Steels, Dr. John G. Speer Dr. David K. Matlock Mr. Bryce Lakamp Dr. Rongjie Song, mayo 30 2007.....	25
Figura 21. Representación de la elongación del punto de fluencia de acuerdo a norma ASTM E 8 vs diagrama esfuerzo deformación para una acero de bajo carbono antes y después del temple, así como la relación de la fluencia con el YPE de acuerdo a la cantidad de temple realizado, Yield Point Elongation In Surface Critical Steels, Dr. John G. Speer Dr. David K. Matlock Mr. Bryce Lakamp Dr. Rongjie Song, mayo 30 2007.....	25
Figura 22. Rangos de las propiedades mecánicas que clasifican al acero laminado en frío bajo Norma ASTM A 1008 en diferentes calidades de acuerdo a su ductilidad.....	26
Figura 23. Probeta estipulada por la norma ASTM E8 para ensayo de tensión de materiales planos y maquina universal de ensayos utilizada para determinar las propiedades mecánicas por tensión uniaxial.....	27
Figura 25. Ejemplos de piezas metálicas sometidas a procesos de embutición....	28
Figura 26. Diagrama esquemático del troquelado en un disco de acero con las características relevantes de la anisotropía en cada zona deformada. Formabilidad en aceros, Rafael Colás, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.....	29
Figura 27. Diagrama esquemático del muestreo para el ensayo de tensión que se debe realizar de acuerdo a norma ASTM A 517 sobre el material a 0°, 45° y 90° de la dirección de laminación para determinación del índice r.....	29
Figura 28. Desarrollo aritmético para obtener el índice de anisotropía r por medio del ensayo de tracción de acuerdo a norma ASTM A 517 sobre el material a 0°, 45° y 90° de la dirección de laminación.....	30
Figura 29. Diagrama esquemático de la tendencia a la formación de orejas, dependiendo del valor de anisotropía planar Δr y del valor de anisotropía en cada dirección con respecto al sentido de laminación. Microtextura aplicada ciência dos materiais, André Luis Pinto, Instituto Militar de engenharia.....	31
Figura 30. Diagrama esquemático de la tendencia a la formación de orejas a medida que la anisotropía planar es diferente a cero.....	31
Figura 31. Variación de la anisotropía con respecto a la composición química del acero en las diferentes direcciones del ensayo.....	32
Figura 32. Variación de la anisotropía con respecto a la resistencia máxima del acero.....	32

Figura 33. Variación de la anisotropía con respecto al tamaño de grano en diferentes composiciones químicas de acero.....	33
Figura 34. Variación de la anisotropía con respecto a la temperatura de embobinado en caliente del acero.....	33
Figura 35. Variación de la anisotropía con respecto a la cantidad de reducción impartida al acero previo al recocido.....	33
Figura 36. Representación esquemática de la deformación plástica de un espécimen hasta llegar a la fractura.....	34
Figura 37. Diferentes índices de endurecimiento por deformación n para muestras ensayadas por tensión uniaxial.....	35
Figura 38. Curva esfuerzo vs deformación real e ingenieril y pendiente para el cálculo del coeficiente de endurecimiento por deformación en un gráfico logarítmico.....	36
Figura 39. Curva esfuerzo vs deformación ingenieril con diferentes relaciones de TS/YP y con variación directamente proporcional a la relación TS/YP.....	36
Figura 40. Rollo de prueba número 2, con las galgas instaladas para instalar la termocupla que hace el registro de temperatura durante el recocido.....	39
Figura 41. Esquema del montaje del recocido de acero IF, con los perfiles de temperatura esperados para el gas y el material para la posición 2, al igual que el ΔT que se busca en el tratamiento.....	40
Figura 42. Diagrama esquemático de las muestras tomadas para cada rollo en diferente sentido 0° , 45° y 90° y punto de muestreo para determinar tipo de estructura y tamaño de grano por metalografía.....	42
Figura 43. Curva del tratamiento térmico de recocido con monitoreo de temperatura al acero IF de la primera prueba para conocer y caracterizar el material.....	44
Figura 44. Registro fotográfico de los puntos más relevantes del proceso de preparación y del recocido de los aceros IF de prueba.	
1: Cargue de los rollos e instalación de las termocuplas en cada rollo.	
2: Instalación de termocupla de respaldo para la atmosfera interna.	
3: Sellado del flanche por donde salen las termocuplas hacia el registrador.	
4: Conexión y registro de termocuplas en sistema adquisición de datos.	
5: Fin del calentamiento del recocido de prueba con acero IF.....	46
Figura 45. Curva de temperatura vs tiempo, obtenida en el recocido de prueba para el rollo IF en la posición 2 y el gas de la atmosfera interna del tratamiento térmico.....	47
Figura 46. Ejemplo del cálculo de anisotropía plástica y planar para uno de los rollos de acero IF después de obtener la información del ensayo de tensión.....	50

Figura 47. Gráfica comparativa del índice de anisotropía plástica r , después del recocido de prueba y después del temple.....	51
Figura 48. Gráfica comparativa del índice de anisotropía planar Δr , después del recocido de prueba y después del temple.....	52
Figura 49. Gráfica comparativa del índice de anisotropía plástica para los aceros IF de 0.60 mm de espesor, SAE 1006 DDQ de 0.60 mm y 0.45 mm.....	54
Figura 50. Gráfica comparativa del índice de anisotropía planar calculado para los aceros IF y SAE 1006 calidad DDQ de espesor 0.60 mm.....	54
Figura 51. Gráficas comparativas del índice de anisotropía plástica y planar calculado para los aceros IF de prueba después del recocido.....	55
Figura 52. Gráficas comparativas del índice de anisotropía plástica y planar calculado para los aceros IF de prueba después de temple.....	55
Figura 53. Gráficas comparativas del índice de anisotropía plástica y planar calculado para los aceros SAE 1006 DDQ de espesor 0.60 mm.....	55
Figura 54. Gráficas comparativas del índice de anisotropía plástica y planar calculado para los aceros SAE 1006 DDQ de espesor 0.45 mm.....	56
Figura 55. Gráficas comparativas del índice de anisotropía plástica con respecto a la composición química del acero.....	56
Figura 56. Ejemplo del cálculo del índice de endurecimiento por deformación n de los rollos de acero IF después de obtener la información del ensayo de tensión.....	57
Figura 57. Probetas del ensayo de tensión uniaxial correspondientes al rollo de acero IF 97749AAA y 97749AAAA con diferente índice de endurecimiento por deformación.....	59
Figura 58. Gráfica que muestra el valor del índice de endurecimiento por deformación para cada rollo IF después del tratamiento térmico de recocido y del temple.....	59
Figura 59. Valores de n y relación TS/YP obtenidos en los aceros IF del recocido de prueba antes y después del temple.....	59
Figura 60. Relación TS/YP obtenidos en los aceros IF del recocido de prueba antes y después del temple.....	60
Figura 61. Índice de endurecimiento por deformación n de los aceros de prueba IF y SAE 1006 DDQ comercializados en espesor 0.61 mm.....	61
Figura 62. Relación TS/YP obtenida de los ensayos de tensión a los aceros de prueba IF y SAE 1006 DDQ comercializados en espesor 0.60 y 0.45 mm.....	62

Figura 63. Endurecimiento por deformación n vs Relación TS/YP obtenida de los ensayos de tensión a los aceros de prueba IF y SAE 1006 DDQ comercializados en espesor 0.60 y 0.45 mm.....	62
Figura 64. Relación existente entre el YPE, n y TS/YP con el porcentaje de reducción del temple.....	63
Figura 65. A Izquierda se encuentran dos registros del ensayo de tensión obtenido para el rollo IF 97752 (antes y después de temple) y a la derecha gráfica que explica la incidencia del temper en la eliminación del YPE.....	64
Figura 66. Gráfica de las propiedades mecánicas de fluencia y resistencia, antes y después del temple.....	65
Figura 67. Gráfica de las propiedades mecánicas de dureza y elongación, antes y después del temple.....	65
Figura 68. Microscopio metalográfico de platina invertida PMG3 y pantalla del analizador de imágenes Clemex Vision PE 5.0.....	66
Figura 69. Análisis del tamaño de grano ASTM E 112 con el analizador de imágenes Clemex Vision PE. 5 para el acero IF 97751 AAAA.....	67
Figura 70. Metalografías correspondientes al rollo IF 97750 representativa de los aceros IF de la prueba en cada uno de los estados por los que estuvieron (lamina en caliente, lamina en frío, lámina recocida y lamina con temple).....	68
Figura 71. Metalografías correspondientes al rollo IF 97752 y al rollo SAE 1006 DDQ 11196, cuya matriz es ferrítica pero con diferente morfología, equiaxial para el IF y pancake para el SAE.....	68
Figura 72. Metalografías correspondientes a los rollos IF Y SAE 1006 DDQ, con presencia de matriz ferrítica, pero con grano equiaxial para los IF y grano pancake para los SAE, el tamaño de grano a 100X es ASTM N 8 que corresponde a un grano fino.....	69
Figura 73. Resumen del recocido de prueba a 690°C con ΔT de 10°C para los aceros IF, las propiedades mecánicas y el tipo de estructura resultante.....	70
Figura 74. Curva tratamiento térmico de acero IF a 680°C con $\Delta T < 10^\circ\text{C}$ para una carga de 83.525 kg.....	74
Figura 75. Registro de las curvas esfuerzo vs deformación del recocido a 680°C sin temple.....	75
Figura 76. Curva tratamiento térmico de acero IF a 690°C con $\Delta T < 10^\circ\text{C}$ para una carga de 84.045 kg.....	76

Figura 77. Registro de las curvas esfuerzo vs deformación del recocido a 690°C sin temple.....	77
Figura 78. Curva tratamiento térmico de acero IF a 700°C con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ para una carga de 83.425 kg.....	78
Figura 79. Registro de las curvas esfuerzo vs deformación del recocido a 700°C sin temple.....	79
Figura 80. Perfil térmico de los 3 niveles de temperatura utilizados para realizar el recocido de aceros IF para cargas mayores a 80.000 kg con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ para obtener calidad embutición.....	80
Figura 81. Cambios de la morfología de la curva esfuerzo vs deformación en la medida que aumenta la temperatura de recristalización.....	81
Figura 82. Variación de la curva esfuerzo deformación después del temple en aceros IF recocidos a 680°C con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$	83
Figura 83. Variación de la curva esfuerzo deformación después del temple en aceros IF recocidos a 690°C con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$	84
Figura 84. Variación de la curva esfuerzo deformación después del temple en aceros IF recocidos a 700°C con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$	85
Figura 85. Curva tratamiento térmico de acero IF a 680°C con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ para una carga de 57.925 kg.....	86
Figura 86. Curva tratamiento térmico de acero IF a 690°C con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ para una carga de 60.110 kg.....	87
Figura 87. Curva tratamiento térmico de acero IF a 700°C con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ para una carga de 59.415 kg.....	88
Figura 88. Perfil térmico de los 3 niveles de temperatura utilizados para realizar el recocido de aceros IF con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ en cargas inferiores a 60.000 kg.....	89
Figura 89. Ejemplo del impacto negativo encontrado en la investigación que tiene el temple sobre la fluencia y sobre la eliminación de la elongación del punto de fluencia.....	94
Figura 90. Resultados del análisis de varianza hecho en Minitab para determinar el grado de sensibilidad que tienen las propiedades mecánicas de acuerdo al tipo de material.....	96

Figura 91. Resultados del análisis de varianza realizado en Minitab para determinar el grado de sensibilidad que tienen las propiedades mecánicas de acuerdo al tipo de material para los resultados de 0.45 mm.....	98
Figura 92. Resultados del análisis de varianza realizado en Minitab para determinar el grado de sensibilidad que tienen las propiedades mecánicas de acuerdo al tipo de material para los resultados de 0.60 mm.....	99
Figura 93. Resultados del análisis de varianza realizado en Minitab para determinar el grado de sensibilidad que tienen las propiedades mecánicas de los aceros IF recocidos y sin templar con respecto a la temperatura de recristalización.....	101
Figura 94. Resultados del análisis de varianza realizado en Minitab para determinar el grado de sensibilidad que tienen las propiedades mecánicas de los aceros IF recocidos y templados en la primera corrida de la investigación con respecto a la temperatura de recristalización.....	104
Figura 95. Resultados del análisis de varianza realizado en Minitab para determinar el grado de sensibilidad que tienen las propiedades mecánicas de los aceros IF recocidos y templados en la segunda corrida de la investigación con respecto a la temperatura de recristalización.....	105
Figura 96. Ecuación encontrada para cada temperatura de recristalización en los dos niveles de carga utilizados.....	106

1. INTRODUCCION

1.1. ANTECEDENTES

La industria Colombiana dedicada a la fabricación de piezas troqueladas y estampadas ha sido abastecida a través de la importación de materias primas. Acesco como empresa dedicada a transformar el acero llevándolo desde laminado en caliente a laminado en frío base para la fabricación de la materia prima de esta industria, ve la necesidad de iniciar con el proyecto de desarrollar lámina calidad de embutición con aceros libres de intersticios y así entrar en un programa de sustitución de importaciones.

El desarrollo de lámina apta para procesos de embutición y estampado, abarca:

1. Implementación en laboratorio de ensayos mecánicos para determinar propiedades mecánicas de anisotropía que clasifiquen un acero como calidad de embutición.
2. Estudio de normas técnicas para la realización de dichos ensayos.
3. Profundización en la metalurgia de los aceros micro aleados IF, como aceros de avanzada para este tipo de trabajo y la comparación con aceros SAE 1006 tradicionalmente utilizados en Colombia.
4. Desarrollo y optimización del tratamiento térmico de recocido, tomando como variable fundamental para el diseño de experimento el gradiente de temperatura entre material y gas, y la temperatura de recristalización de estos aceros.

1.2. PLANTEAMIENTO DE LA PREGUNTA O PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN

El proyecto propone a través de trabajos de caracterización en materiales, estudio de normas, propiedades mecánicas y ensayos, aplicación de estadística descriptiva e inferencial y diseño de experimentos, para el tratamiento térmico de recocido en campana en aceros libres de intersticio "IF", conseguir alta capacidad de embutición, como una estrategia para el desarrollo de nuevos productos a nivel nacional que busca minimizar las importaciones, actualizar la industria de estampados y embutición y mantener un liderazgo tecnológico en el sector metalmecánico.

La industria Metalmecánica Colombiana, específicamente la de auto partes, se dedica a la transformación de aceros delgados laminados en frío para la conformación de piezas a través de procesos de estampado y embutido. Su materia prima que puede llegar a 2000 toneladas anuales en materiales de espesores inferiores a 1 mm es importada debido a la ausencia de un proveedor nacional.

Estos aceros con calidad de embutición, provienen de países como Venezuela, Brasil, México y Japón entre otros y su metalurgia esta basada en los aceros tradicionalmente conocidos y comercializados bajo normas AISI SAE, como lo es el caso del SAE 1006, cuyos niveles de carbono y manganeso son suficientes para incorporar en su estructura cristalina, gran cantidad de intersticios o espacios vacíos que lo hacen altamente deformable pero con baja resistencia posterior a un tratamiento térmico de recocido.

Durante la última década, la siderurgia ha venido evolucionando en el uso de elementos de aleación con el fin de desarrollar un tipo de aceros que busca mantener un equilibrio entre la formabilidad o estampabilidad y la resistencia mecánica, estos aceros conocidos como aceros libres de intersticios "IF", deben sus propiedades a su metalurgia, la cual se presenta en ausencia de intersticios debido a sus bajos niveles de carbono y manganeso y a la adición de microaleantes durante el proceso de fabricación como el Titanio y el Niobio, que trabajan como agentes estabilizadores de la matriz ferrítica, produciendo nitruros de titanio que se precipitan al interior del grano ferrítico, obstaculizando el movimiento de dislocaciones durante la deformación del acero.

Esta metalurgia se traduce en el mejoramiento de su capacidad de deformación, que conceptualmente hace referencia a la anisotropía que presenta el material después de recocido, al endurecimiento por deformación y a la anisotropía planar, variables que no son entendidas por quienes utilizan estos aceros, ya que en el día a día solo manejan las propiedades mecánicas normales, como la fluencia (YP), resistencia máxima (TS) y elongación (A %). Por esta razón es importante estudiar bajo normas ASTM (E8, E517, E646), diferenciar y jerarquizar las propiedades mecánicas que clasifican bajo norma ASTM A 1008 un acero como calidad de embutición, diferenciando aquellas que se obtienen por medio de ensayos fundamentales de las que se obtienen a través de ensayos simulativos y de esta forma divulgar y actualizar el conocimiento en la industria.

La anisotropía plástica es una característica presente en los materiales policristalinos en mayor o menor grado y que obedece a la capacidad que tienen estos para moverse preferencialmente sobre sus sistemas de deslizamiento al estar sometidos a procesos de deformación, altamente relacionada a la textura cristalográfica del material y que guarda una fuerte dependencia de procesos como el de recrystalización (tratamiento térmico). En términos de procesos de embutición, la podemos definir como una respuesta mecánica a la capacidad que tiene un material a deformarse sobre su plano de laminación sin adelgazar significativamente su espesor, es decir, la capacidad que tiene para acomodar la deformación plástica sobre su plano de laminación. Esta característica en los aceros es cuantificada a través del índice r y la anisotropía planar, calculados ambos por medio del coeficiente de Lankford " r ", el cual es medido sobre la dirección de las fibras del material (cero grados), perpendicular a las fibras (noventa grados) y en dirección de cuarenta y cinco grados, observándose asimetría en sus resultados. Los materiales con buena capacidad de embutición exhiben valores de anisotropía plástica (índice r) entre 1.8 y 2.0 y anisotropía planar (Δr) cercanos a 0, mientras que aquellos que presenten valores inferiores de anisotropía plástica y altos valores de anisotropía planar no tendrán alta capacidad de deformación.

Acesco como empresa pionera del proceso de laminación en frío para planos en Colombia, se encuentra en la responsabilidad de desarrollar y suministrar a la industria Colombiana de auto partes, aceros que respondan a los avances siderúrgicos como lo son los aceros libres de intersticios "IF" con calidad de embutición profunda, mejorando técnicamente lo actualmente utilizado y actualizando el conocimiento acerca de estos materiales.

Además de la composición química del acero que lo cataloga como acero libre o no de intersticios, es necesario tener en cuenta que las propiedades de anisotropía que revelan a un acero como acero apto para embutir dependen también de su estructura, la cual viene ligada a los procesos térmicos como es el caso de tratamiento térmico de recocido. Este proceso que es realizado en atmósfera reductora 100% con hidrógeno para evitar la oxidación por temperatura del acero y que le devuelve a este las propiedades mecánicas de formabilidad perdidas después del proceso de laminación en frío, es determinante para generar un excelente índice r . El Recocido consiste en someter el material que ha sido laminado en frío, a un calentamiento lento por encima de la temperatura de recrystalización, en esta primera etapa se busca liberar los esfuerzos residuales del proceso de laminación y propiciar por medio de la temperatura el crecimiento de grano. Una vez el material alcanza la temperatura de

recristalización, una segunda etapa llamada etapa de sostenimiento inicia con el fin de completar el proceso de recristalización y homogenizar la estructura granular, el sostenimiento es realizado a una misma temperatura pero variando el tiempo. Finalmente cumplidas las etapas de calentamiento y sostenimiento, se procede a terminar el recocido con el enfriamiento el cual debe ser realizado de forma lenta y así evitar el refinamiento de grano.

En el tratamiento térmico de recocido en campana a gran escala, la temperatura de calentamiento y el tiempo de sostenimiento son variables que dependen del peso de la carga (cantidad de rollos a recocer) y de la calidad del material que se busca. Para el caso de aceros para embutición, es necesario buscar que la temperatura de recristalización alcanzada en el recocido, este muy cerca de la temperatura de registro del proceso correspondiente a la temperatura del gas reductor, esta diferencia entre las dos temperaturas es llamada gradiente de temperatura (ΔT) entre el punto más frío (acero) y el más caliente (gas). Como la única manera de obtener el gradiente de temperatura que nos proporcione al final del recocido un índice de anisotropía adecuado, es midiendo por medio de termocuplas colocadas al acero la temperatura de este, procedimiento no muy convencional y que solo es usado en investigación, la finalidad del proyecto busca por medio de estas mediciones, caracterizar el proceso, medir la sensibilidad de las variables de respuesta (propiedades mecánicas) a las variaciones de temperatura por medio de un diseño de experimentos y obtener la información que permita validar un modelo térmico para predecir los tiempos de calentamientos en función de la carga, para así llegar a una ruta metodológica que permita conocer y optimizar el tratamiento térmico en aceros IF para obtener calidad de embutición.

Para determinar el gradiente de temperatura en el proceso de recocido en campana se tomará como temperatura del acero (punto más frío del tratamiento térmico), la temperatura registrada por la termocupla del segundo rollo de cada carga, simplificando así las mediciones. Lo anterior se decide de acuerdo a los resultados obtenidos en la tesis de maestría del Ingeniero Humberto Gómez, en donde se identificó a través de un diseño de experimentos que la posición dos de una carga de recocido en Campana, corresponde al punto más frío de todo el material sometido al tratamiento térmico de recocido, de esta forma garantizando la temperatura de este rollo se garantiza que toda la carga llegue al gradiente esperado.

1.3. OBJETIVOS

El proyecto propone a través de trabajos de caracterización en materiales, estudio de normas, propiedades mecánicas y ensayos, aplicación de estadística descriptiva e inferencial y diseño de experimentos, para el tratamiento térmico de recocido en campana en aceros libres de intersticio “IF”, conseguir alta capacidad de embutición, como una estrategia para el desarrollo de nuevos productos a nivel nacional que busca minimizar las importaciones, actualizar la industria de estampados y embutición y mantener un liderazgo tecnológico en el sector metalmecánico.

1.3.1 Objetivo general

Optimizar el proceso de recocido de recristalización para obtener en aceros libres de intersticios calidad de embutición profunda.

1.3.2 Objetivos específicos

2. Identificar los ensayos necesarios para la clasificación de aceros IF y SAE 1006 para embutición profunda, según normas.
3. Analizar los resultados de los ensayos previos hechos a muestras recocidas a 690 °C de aceros IF y SAE 1006 para clasificarlos de acuerdo a sus propiedades mecánicas en términos de capacidad de embutición y elegir así la temperatura para recocidos de línea.
4. Caracterizar mecánica y microestructuralmente las muestras de aceros recocidas con el fin de diferenciar el efecto de la composición química sobre la anisotropía plástica y el índice de endurecimiento por deformación.
5. Realizar el diseño de experimentos a gran escala sobre aceros IF (libre de intersticios) teniendo como base la temperatura del recocido de recristalización previo, con el fin de medir el efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas de los dos tipos de aceros.
6. Desarrollar los experimentos de tratamientos térmicos resultantes del diseño experimental.
7. Determinar el grado de sensibilidad de la temperatura del recocido de recristalización sobre el esfuerzo de Fluencia (YP), Resistencia máxima (TS), Anisotropía plástica (r) y Endurecimiento por deformación (n), aplicando estadística descriptiva e inferencial.

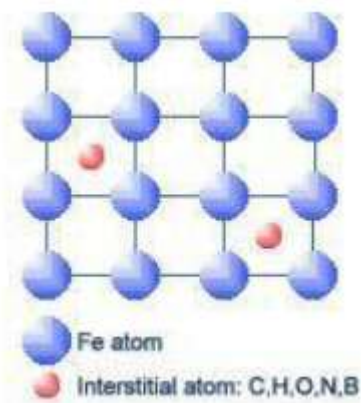
8. Determinar el efecto del grado de deformación posterior al recocido (Temper Rolling) sobre el esfuerzo de Fluencia (YP), Resistencia máxima (TS), Anisotropía plástica (r) y endurecimiento por deformación (n) de los aceros, aplicando análisis de varianza.

2. MARCO TEORICO.

2.1. ACEROS LIBRES DE INTERSTICIOS “ IF steel “

Estos aceros han sido creados como una necesidad de la industria en buscar un equilibrio entre las propiedades mecánicas, su resistencia y la posibilidad de encontrar a la vez condiciones de estampabilidad y embutición. Su fabricación y evolución data hacia la década de los 70 y su metalurgia radica en la eliminación o minimización de los átomos intersticiales presentes en la red cristalina de hierro, como es el caso del carbono, nitrógeno y oxígeno, los cuales tienen un efecto marcado en el comportamiento del acero a la deformación, debido al endurecimiento generado por solución sólida, que limita poder ejercer grandes deformaciones sin que aparezcan defectos superficiales en el acero o fallas prematuras.

Figura 1. a) Átomos intersticiales en red cristalina de hierro, b) Elementos de embutición profunda fabricados con aceros IF.

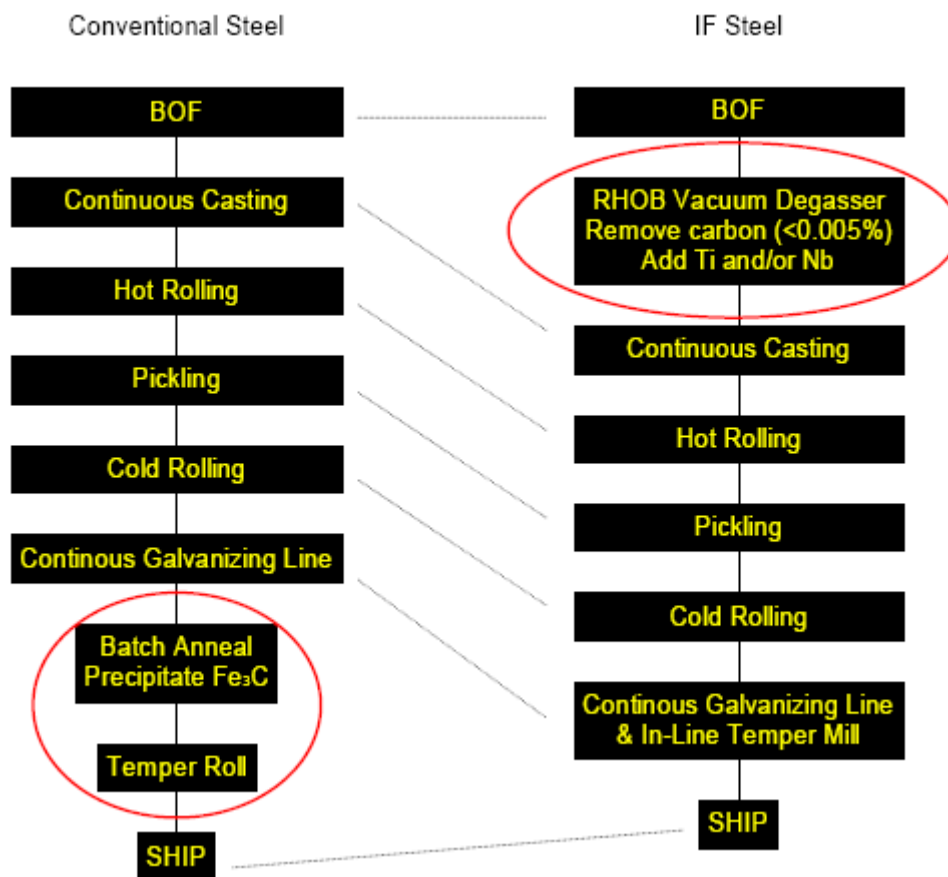


www.krakatussteel.com

La fabricación se da con respecto a la vía convencional, por medio de técnicas dentro de la metalurgia secundaria, como la desgasificación al vacío del metal líquido con argón después de su afino primario en el convertidor de oxígeno (VOD) y la adición de elementos estabilizadores como el Ti y el Nb. Con la desgasificación al vacío se busca oxidar y eliminar la mayor parte de átomos intersticiales como carbono y nitrógeno presentes en el acero líquido, para luego a través de la inserción de micro aleantes como Ti y Nb estabilizar las partes por millón que han quedado de estos átomos en forma de nitruros y carburos. Con estas dos etapas adicionales al proceso

convencional en la fabricación de aceros, se ha logrado reducir y limitar el contenido de carbono y nitrógeno desde 300 ppm (0.03 % en peso) hasta llegar a conseguir niveles inferiores a 50 ppm (< 0.005 % en peso), removiendo totalmente los átomos intersticiales presentes en solución sólida por la acción de los elementos estabilizadores [1].

Figura 2. Etapas adicionales dentro del proceso de fabricación de acero, necesarias para reducir y eliminar los átomos intersticiales en solución sólida para obtener aceros libres de intersticios.



La estabilización con micro aleantes para eliminar los átomos intersticiales en solución sólida, se puede dar por medio del uso estequiométrico de aleantes como el titanio y el niobio, los cuales pueden ser utilizados por separado, es decir estabilizando para formar compuestos o partículas de segunda fase con uno o con otro respectivamente o en forma combinada (Ti/Nb). Su uso obedece a las características finales del acero y a cálculos estequiométricos, debido al costo que tienen estos microaleantes, siendo menos costoso y por ende más utilizado el Titanio y en menor cantidad por su costo el

Niobio. La cantidad estequiométrica que se utiliza está definida por la siguiente ecuación para cada caso de elementos estabilizadores.

Acero IF estabilizado con Titanio

$$Ti_{\text{(estequiométrico)}} = 4(\%C) + 3,42(\%N) + 1,5(\%S) \quad (1)$$

$$Ti_{\text{(exceso)}} = \% Ti_{\text{total}} - 4(\%C) - 3,42(\%N) - 1,5(\%S) \quad (2)$$

La primera ecuación busca la precipitación de todos los átomos intersticiales, pero debido a la gran afinidad que existe del Titanio por el nitrógeno y el azufre, este primero se combinará formando TiN, y TiS, por tal razón buscando una precipitación total es necesario siempre colocar un exceso de este elemento para que combine también el carbono como TiC, mejorando así las condiciones de formabilidad del acero. Los excesos de Ti de acuerdo a estudios realizados por Bhattacharya en 1989 muestran como la temperatura de recrystalización aumenta y el proceso como tal se retarda por encima de este valor, así como las propiedades de formabilidad y estampabilidad mejoran debido al aumento del tamaño de grano, la ductilidad expresada en elongación, el endurecimiento por deformación y disminución del límite elástico y la resistencia máxima del acero [2].

Figura 3. Efecto del contenido de Titânio en exceso sobre la temperatura de recrystalización de aceros libres de intersticios (Bleck, 1990) (Bibliografía, Efeito da Variação das Condições de Encharque nas Propriedades Mecânicas do Material IF Processado no Recozimento Contínuo da Usiminas, Rodrigo Rocha de Meira, Orientador: Prof. Ronaldo Barbosa 2006)

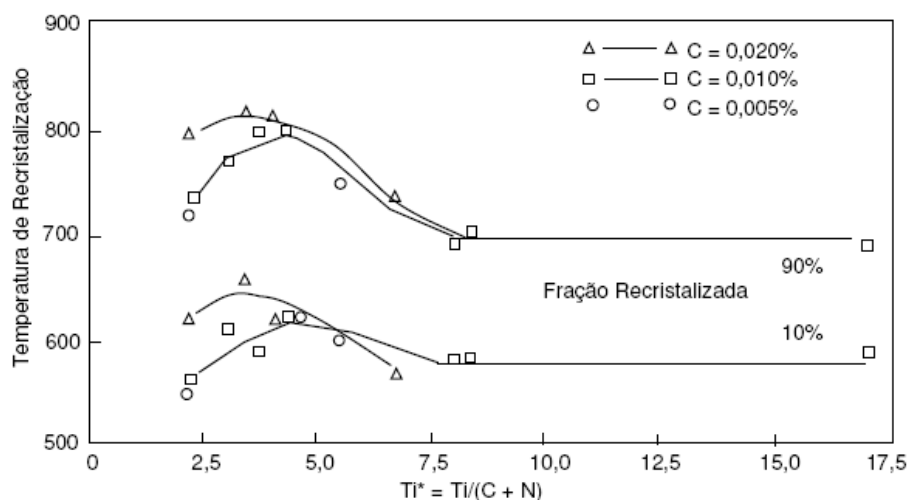
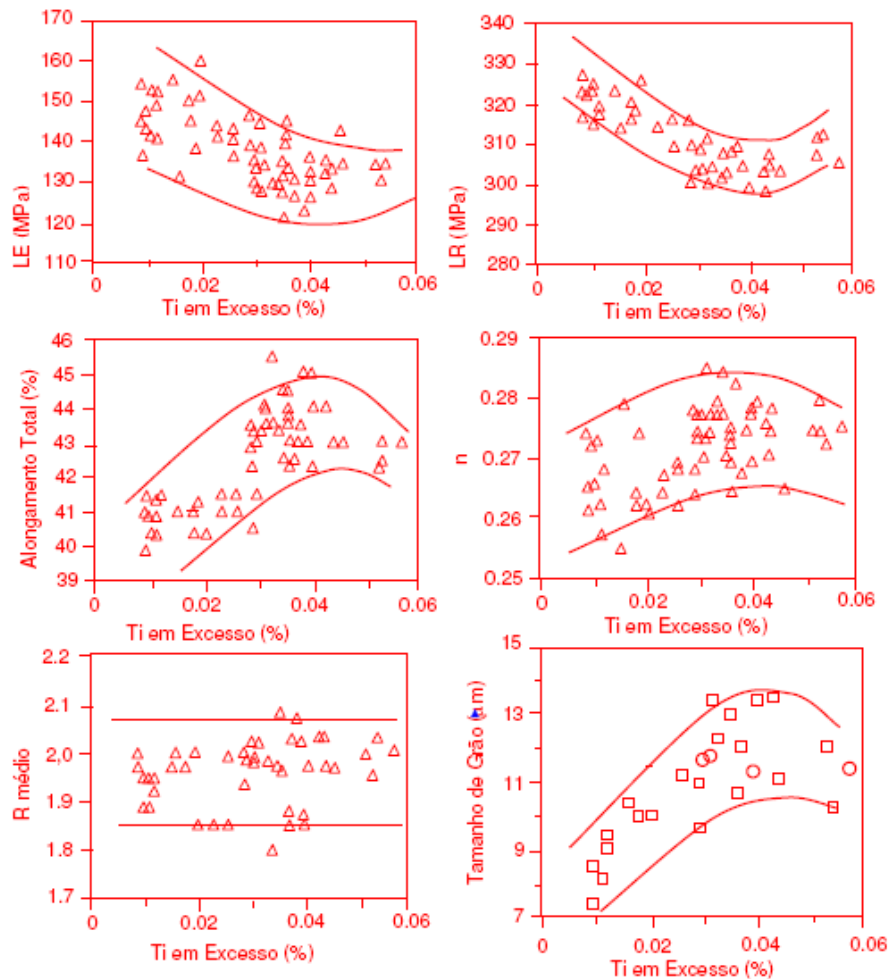


Figura 4. Efecto del contenido de Ti en exceso sobre las propiedades mecánicas en aceros libres de intersticios estabilizados con Ti (Pradhan 1994) (Bibliografia, Efeito da Variação das Condições de Encharque nas Propriedades Mecânicas do Material IF Processado no Recozimento Contínuo da Usiminas, Rodrigo Rocha de Meira, Orientador: Prof. Ronaldo Barbosa 2006)



Acero IF estabilizado con Titanio y Niobio

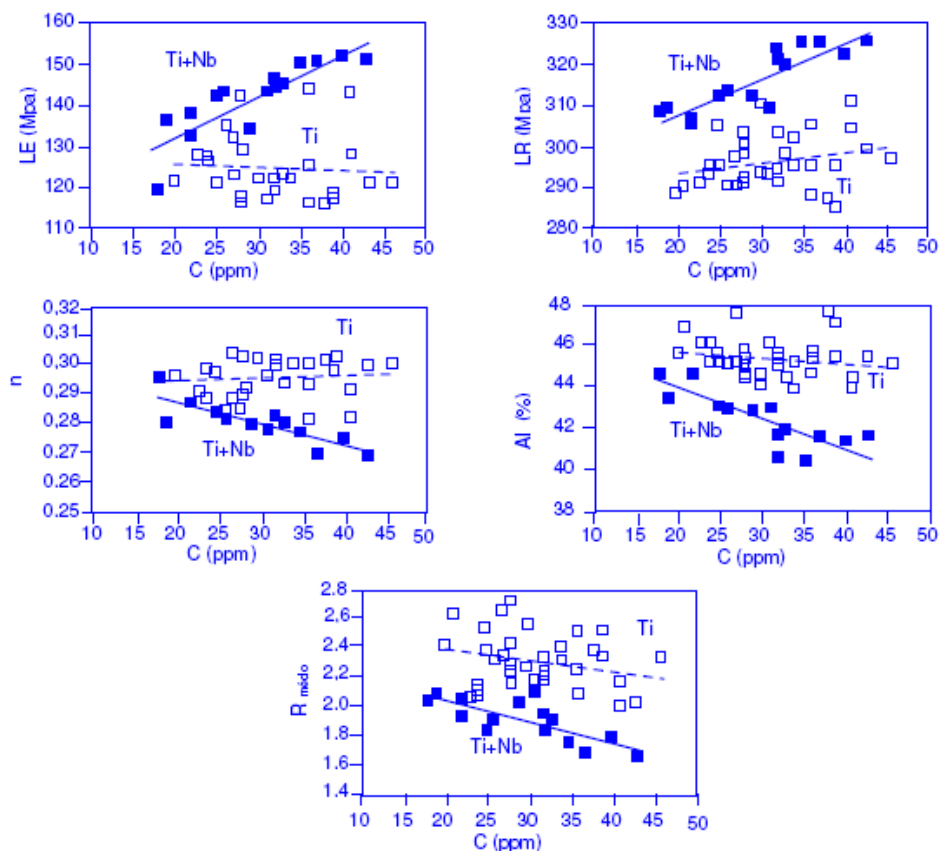
$$\text{Ti}_{(\text{estequiométrico})} = 3,42(\%N) + \square 1,5(\%S) \quad (3)$$

$$\text{Nb}_{(\text{estequiométrico})} = 7.74C \quad (4)$$

El Niobio por tener una mayor afinidad con el carbono, saca este átomo intersticial de solución sólida formando precipitados de NbC, su respuesta a la estampabilidad es menor debido a que su anisotropía se ve afectada, pero su resistencia mecánica aumenta al igual que su punto de fluencia por tener un grano más fino (Pradhan 1994). Es así como este elemento estabilizador en combinación con el Ti proporciona condiciones inmejorables para la fabricación de aceros HSLAS (High Strength Low

Allow Steel), en donde se busca tener buena resistencia con anisotropías medianamente marcadas (Rodrigo Rocha de Meira 2006), las gráficas muestran el efecto de la estabilización solo con Ti (azul punteada) y de la combinación de Ti con Nb (azul continua) en el acero [2].

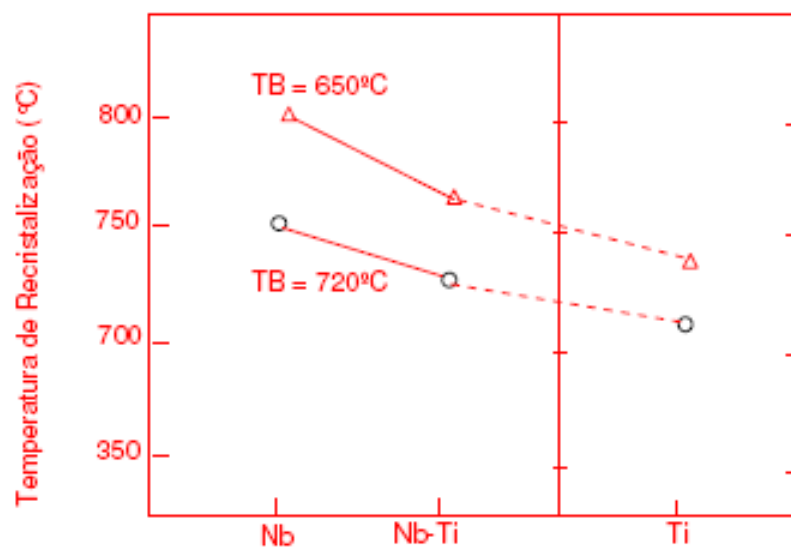
Figura 5. Efecto del contenido de carbono sobre las propiedades mecánicas en aceros libres de intersticios estabilizados con Ti y Ti – Nb (Pradhan 1994) (Bibliografia, Efeito da Variação das Condições de Encharque nas Propriedades Mecânicas do Material IF Processado no Recozimento Contínuo da Usiminas, Rodrigo Rocha de Meira, Orientador: Prof. Ronaldo Barbosa 2006)



Dentro de los procesos posteriores a la fabricación del acero, se encuentra la laminación en caliente y el recocido de campana, tratamientos que dejan ver como los elementos estabilizadores marcan una tendencia a tener mayor o menor temperatura de recrystalización, es así como los aceros estabilizados con Ti, poseen menor temperatura de recrystalización que los aceros estabilizados con Ti/Nb y estos a su vez con los estabilizados con Nb. Los estudios de Bhattacharya en 1989, muestran este efecto.

De igual forma la temperatura de embobinado en laminación en caliente afecta la temperatura de recristalización, es decir a mayor temperatura de embobinado menor temperatura de recristalización y mantiene la tendencia de cada elemento estabilizador, de tal forma que para el caso de Ti la temperatura de recristalización será mas baja que para el caso de Nb [2].

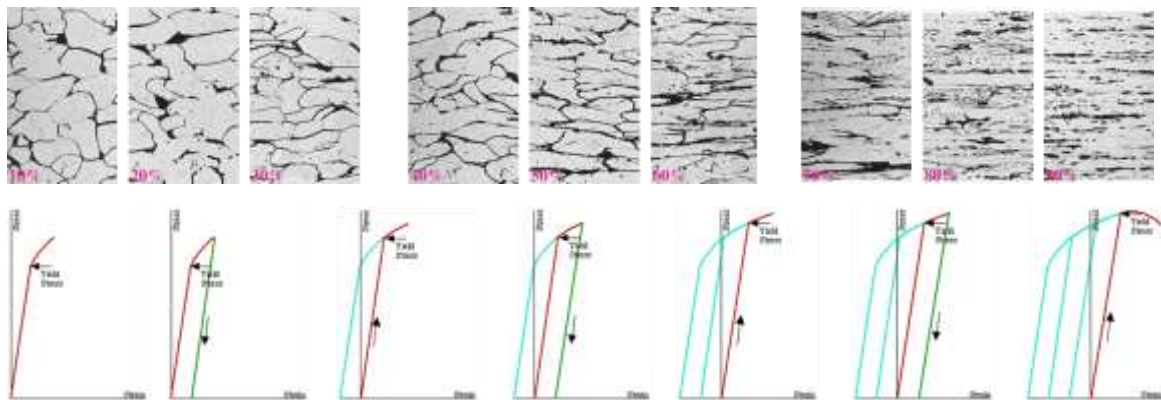
Figura 6. Efecto de la temperatura de embobinado en caliente sobre la temperatura de recristalización, dependiendo del tipo de elemento estabilizador (Ti, Ti – Nb y Nb) (Bhattacharya 1989) (Bibliografia, Efeito da Variação das Condições de Encharque nas Propriedades Mecânicas do Material IF Processado no Recozimento Contínuo da Usiminas, Rodrigo Rocha de Meira, Orientador: Prof. Ronaldo Barbosa 2006)



2.2. RECOCIDO

El tratamiento térmico de recocido busca devolverle a los aceros las propiedades mecánicas características de un material dúctil, pérdidas durante el proceso de trabajo en frío, debido al aumento de tensiones residuales que se generan como respuesta a la permanente deformación del acero, que origina un aumento gradual en la densidad de dislocaciones y que se exterioriza con un aumento significativo de las propiedades mecánicas como el punto de fluencia y la resistencia máxima y una disminución de su elongación, al igual que cambios estructurales, evidenciados por la reducción de área y por la deformación preferencial de su estructura granular en el sentido del trabajo en frío. El proceso de trabajo en frío al que es sometido el acero, altera el patrón de tensiones residuales por efecto de la deformación plástica y disminuye considerablemente la ductilidad del acero [12]. Ver figura 7.

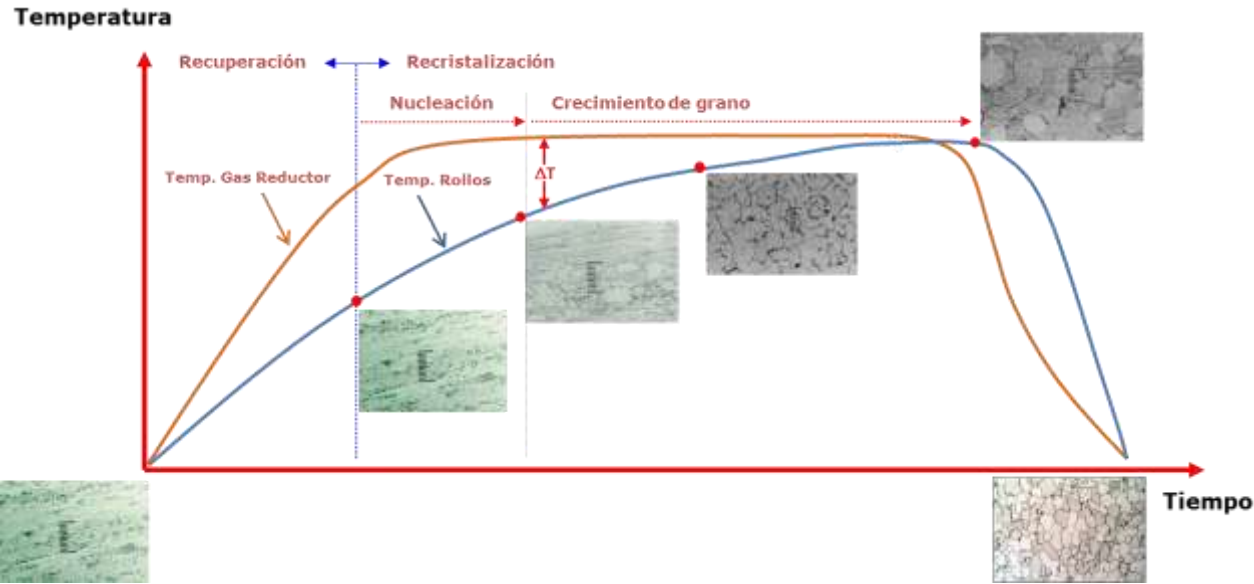
Figura 7. Deformación preferencial sobre la estructura granular y la alteración que se da en el punto de fluencia como consecuencia de la cantidad de deformación plástica permanente proveniente del proceso de trabajo en frío.



Debido a la pérdida significativa de la ductilidad, traducida en el incremento de la fluencia y resistencia, el acero debe ser sometido a un tratamiento térmico de recocido, en el cual mediante el calentamiento de forma controlada hasta temperaturas propias de la metalurgia de cada acero, se busca eliminar esfuerzos o tensiones residuales a través de una etapa del calentamiento a baja temperatura llamada la recuperación y reorientar las dislocaciones a puntos de menor energía a temperaturas superiores por medio de la etapa de recristalización, en donde nacen y crecen nuevos granos a partir de los granos ya deformados preferencialmente durante el trabajo en

frío, para así obtener nuevamente propiedades mecánicas en el acero que le dan características de un material dúctil. Ver figura 8.

Figura 8. Cambio de la estructura durante el tratamiento térmico de recocido en campana



Del tiempo de calentamiento y la temperatura a la cual se calienta el acero, dependerá el nivel de deformación o grado de ductilidad que pueda alcanzar posteriormente el material, clasificando el acero tratado térmicamente en diferentes grados de acuerdo a esta nueva ductilidad, tales grados van desde materiales calidad comercial con capacidad de deformación moderada, pasando por calidad embutición, embutición profunda y llegando hasta la calidad de mayor capacidad de deformación, la calidad de embutición extra profunda. Las calidades designadas en el acero trabajado en frío, especifican además de la fluencia, resistencia y elongación, nuevas propiedades como el índice *r* o anisotropía plástica y el índice *n* o endurecimiento por deformación obtenidas después del tratamiento térmico [6].

La figura 9 muestra la tabla de la norma ASTM A 1008 para material laminado en frío con las diferentes clasificaciones del acero.

Figura 9. Clasificación de aceros laminados en frío de acuerdo a la capacidad de deformación, realizada por la ASTM en el estándar A 1008.

Designation	Yield Strength ^c		Elongation in 2 in. [50 mm] % ^c	<i>r_m</i> Value ^d	<i>n</i> -Value ^e
	ksi	MPa			
CS Types A, B, and C	20 to 40	[140 to 275]	≥ 30	<i>F</i>	<i>F</i>
DS Types A and B	22 to 35	[150 to 240]	≥ 36	1.3 to 1.7	0.17 to 0.22
DDS	17 to 29	[115 to 200]	≥ 38	1.4 to 1.8	0.20 to 0.25
EDDS	15 to 25	[105 to 170]	≥ 40	1.7 to 2.1	0.23 to 0.27

Cada calidad de acuerdo a la norma ASTM A 1008 para una misma composición química y cantidad de trabajo en frío en el acero, dependerá en buena medida de la temperatura de recrystalización a la que se someta el material durante el tratamiento térmico y del tiempo tanto del calentamiento como del sostenimiento que se dé a dicha temperatura de recrystalización, esto enmarca este tratamiento térmico fundamentalmente como un tratamiento en el cual la temperatura de recrystalización y tiempo de sostenimiento a esta temperatura serán inversamente proporcionales a las propiedades mecánicas de fluencia y resistencia y directamente proporcionales a la elongación, la anisotropía plástica y el índice de endurecimiento por deformación, es decir que a mayor temperatura y tiempo de sostenimiento en el recocido, menor será la fluencia y resistencia y mayor la anisotropía plástica, endurecimiento por deformación y porcentaje de elongación final del acero, logrando mayores características de embutibilidad.

Figura 10. Variación de las propiedades mecánicas de acuerdo a la temperatura de recrystalización y tiempo de sostenimiento.

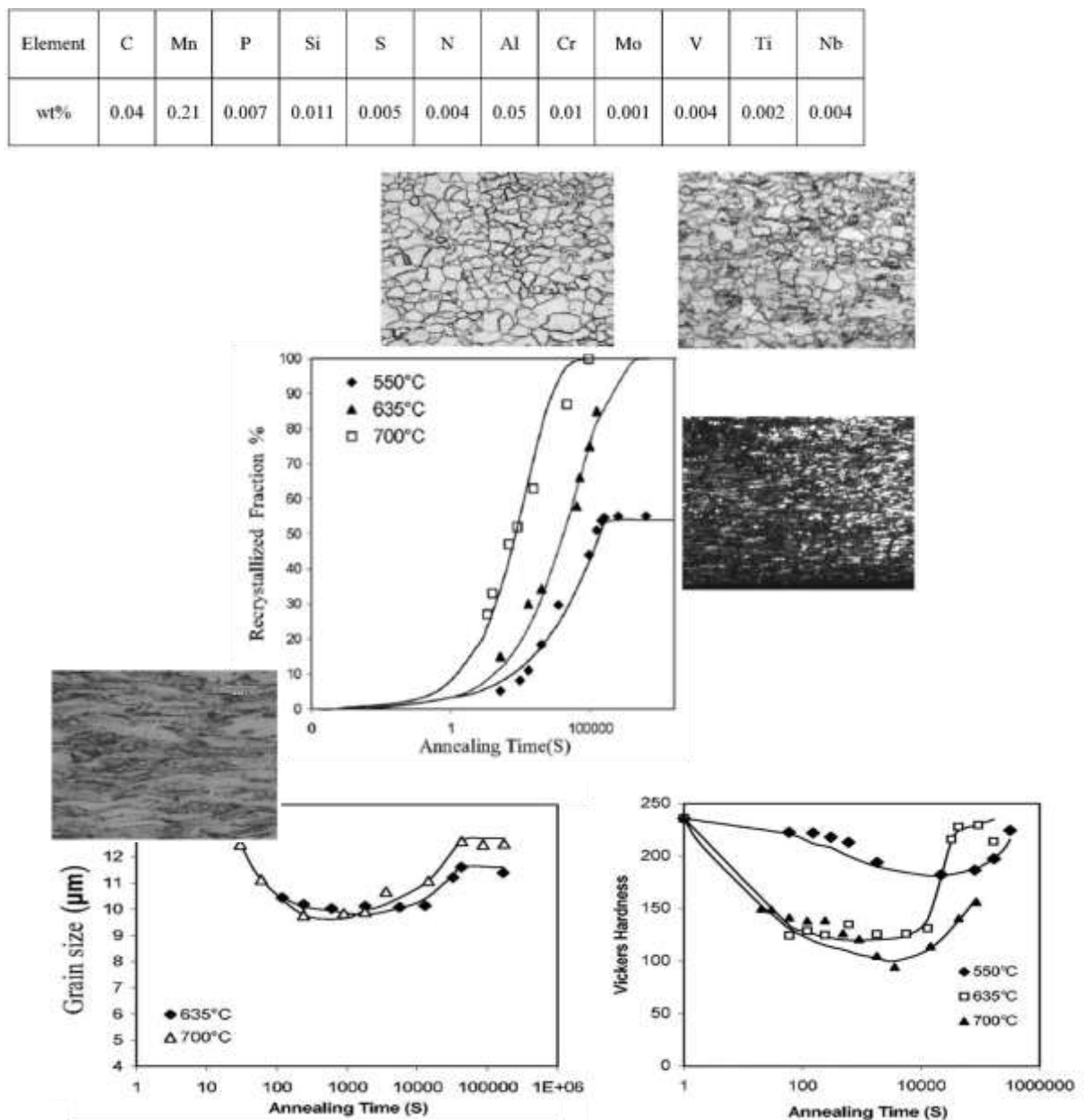


Estas características de embutibilidad, son una consecuencia de la estructura granular obtenida y se traduce físicamente en el acero, según el tamaño de grano final que se genere después del recocido y del porcentaje de fracción recrystalizada de la estructura deformada. Este tamaño de grano así como el porcentaje de fracción recrystalizada en la estructura, tendrán una relación directamente proporcional a la temperatura de recrystalización y tiempo de sostenimiento a esta temperatura durante el tratamiento térmico, es decir que a mayor temperatura y tiempo de sostenimiento, mayor será el tamaño de grano presente en el acero así como la fracción de granos deformados durante el trabajo en frío que son convertidos a granos equiaxiales o pancakes por acción de la recrystalización y por consiguiente, mayor será la capacidad de deformación o ductilidad presente en el material.

Estudios de diferentes autores entre estos B. Soleimani Amiri y G. H. Akbari con un estudio llamado Recrystallization Behavior of Deep Drawing Low Carbon Steel Sheets produced by Mobarakeh Steel Plate, sobre aceros laminados en frío de composición

química SAE 1006 con posterior tratamiento térmico de recocido, identifican las relaciones de la temperatura de recrystalización con el tamaño de grano y las propiedades mecánicas [6].

Figura 11. Efecto de la temperatura de recrystalización y el tiempo de recocido sobre el tamaño de grano, la ductilidad y la fracción de recrystalización en aceros SAE 1006 con 65 % de trabajo en frío. Estudio B. Soleimani Amiri y G. H. Akbari, Recrystallization Behavior of Deep Drawing Low Carbon Steel Sheets produced by Mobarakeh Steel Plate.



2.3. RECOCIDO INDUSTRIAL

A nivel industrial podemos encontrar dos tipos de recocidos para tratar aceros laminados en frío, el primero realizado en línea o en continuo, llamado recocido en continuo, el cual se utiliza para obtener aceros calidad comercial con capacidad de deformación moderada y el segundo llamado recocido en campana o en bache, utilizado para obtener aceros con mayor capacidad de deformación y que son clasificados de acuerdo a la norma ASTM A 1008 como DQ (Drawing Quality), DDQ (Dep Drawing Quality) y EDDQ (Extra Dep Drawing Quality).

Figura 12. Proceso industrial de Recocido en Campana para bobinas de acero.



Figura 13. Equipos que constituyen el Recocido en Campana Industrial de la planta ACESCO para bobinas de acero.



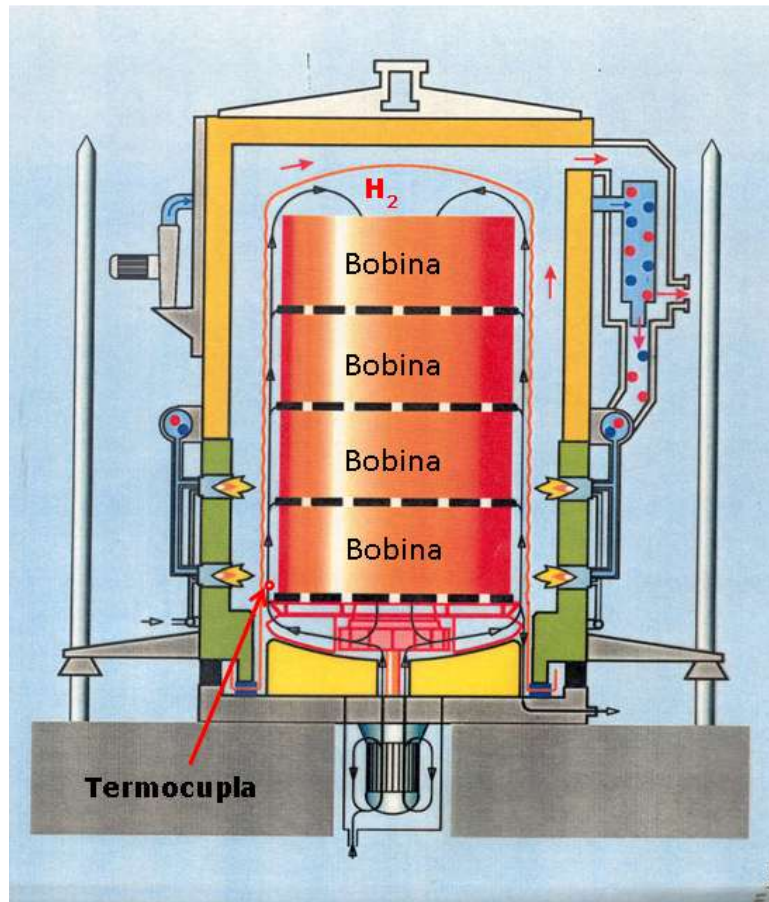
El recocido en campana que se hace a nivel industrial es una de las operaciones más críticas en la producción de aceros planos, debido a que esta envuelve el manejo

sincronizado de variables que buscan una eficiencia térmica de la operación, buena productividad y calidad en el producto final. Para este tratamiento térmico, la instalación debe contar con una campana de calentamiento u horno de calentamiento, una campana de enfriamiento, una base sobre la cual se ubican los rollos o bobinas de acero laminadas en frío a ser tratados y una campana cobertora que se encarga de tapar y aislar del medio externo el material a ser tratado. Ver figura 13.

El acero laminado en frío que se encuentra en bobinas con peso entre 15 y 20 toneladas, es cargado sobre una base en pilas de 4 o 5 bobinas, dependiendo del ancho de esta, cada bobina con su orificio interno mirando hacia el cielo, separadas la una de la otra por un plato convector. La carga que oscila entre 80 y 100 toneladas, es cubierta por una campana cobertora y asegurada a la base por unos seguros hidráulicos que buscan hermeticidad y aislamiento del ambiente en el que se encuentran las bobinas del ambiente externo. Después de colocado el seguro hidráulico, el ambiente interno en el que se encuentran las bobinas es sometido a una prueba de hermeticidad por un tiempo específico, con el fin de asegurar que no hallan fugas internas y luego es sometido a un barrido de seguridad con nitrógeno para remover el oxígeno presente en el lugar en que se encuentran las bobinas. Terminado el barrido de seguridad, la base se encuentra lista para iniciar el calentamiento y para esto se coloca la campana de calentamiento u horno de calentamiento sobre la campana cobertora. Este calentamiento inicia y simultáneamente se va haciendo un barrido del nitrógeno en el interior de la cobertora por hidrógeno, el cual es un gas reductor necesario para acelerar el proceso de transferencia de calor y evitar que las bobinas se oxiden por efecto de la temperatura, este barrido con hidrógeno es realizado hasta que la atmosfera en hidrógeno en el interior de la campana cobertora sea del 100 %.

El proceso de calentamiento es controlado por una termocupla que se encuentra en el interior de la campana cobertora, cerca del diámetro externo de la bobina más baja y que censa la temperatura interna del gas que se encuentra recirculado continuamente desde la parte externa de las bobinas hacia el interior de estas.

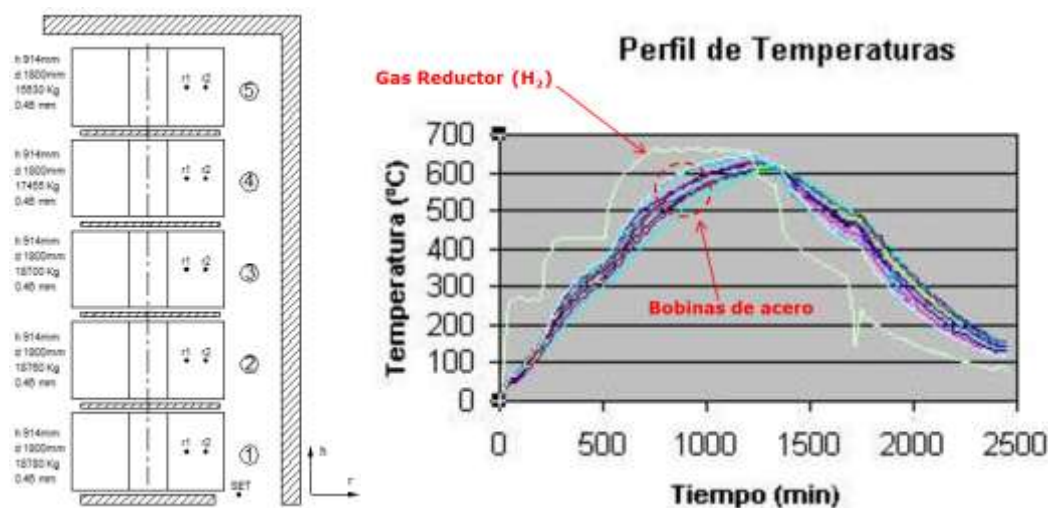
Figura 14. Diagrama esquemático del proceso de calentamiento de bobinas de acero en el recocido en campana, el cual muestra las líneas de flujo del gas reductor (H_2) en el interior de la campana cobertora y la ubicación de la termocupla que controla el proceso. EBNER



El tiempo y la temperatura final de calentamiento es programado de acuerdo al tipo o calidad de material que se desee obtener (CQ, DQ, DDQ o EDDQ) y de acuerdo a la carga que se esté tratando térmicamente, es así que para materiales en los cuales buscamos calidad de embutición (DQ), la temperatura de recristalización utilizada es más alta que la temperatura de un material calidad comercial (CQ) y la forma de asegurar que la temperatura del gas la alcance el material, es prolongando el tiempo de sostenimiento inmediatamente el gas llega a la temperatura de recristalización, para darle tiempo al acero de que su inercia térmica le permita subir y colocarse cerca de la temperatura de gas, esta diferencia entre estas dos temperaturas, es conocida como el gradiente de temperatura (ΔT), el cual en la medida en que disminuye se asegura que la estructura granular complete la fracción de recristalización necesaria para recocer el material. Buscar ΔT iguales o menores a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, equivale a prolongar el tiempo del tratamiento térmico de recocido considerablemente, pasando desde un

recocido para obtener calidad comercial (CQ) de 38 horas para 85 Toneladas hasta un recocido de 50 horas o más para calidad embutición profunda (DQ) con la misma carga. Estas diferencias en tiempos para alcanzar el ΔT deseado son calculadas de forma experimental, mediante la instalación de termocuplas en las bobinas y el registro de estas junto con la temperatura del gas reductor.

Figura 15. Perfil de instalación de termocuplas para definir ΔT en una carga de bobinas de acero sometidas al proceso de recocido en campana y la curva que registra la variación del gas con respecto a la temperatura del acero en el tiempo. ESTUDIO DEL PROCESO DE RECOCIDO EN CAMPANA (BATCH ANNEALING) PARA MEJORAR LA EMBUTIBILIDAD DE ACEROS DESTINADOS A ESTAÑAR Y/O CROMAR

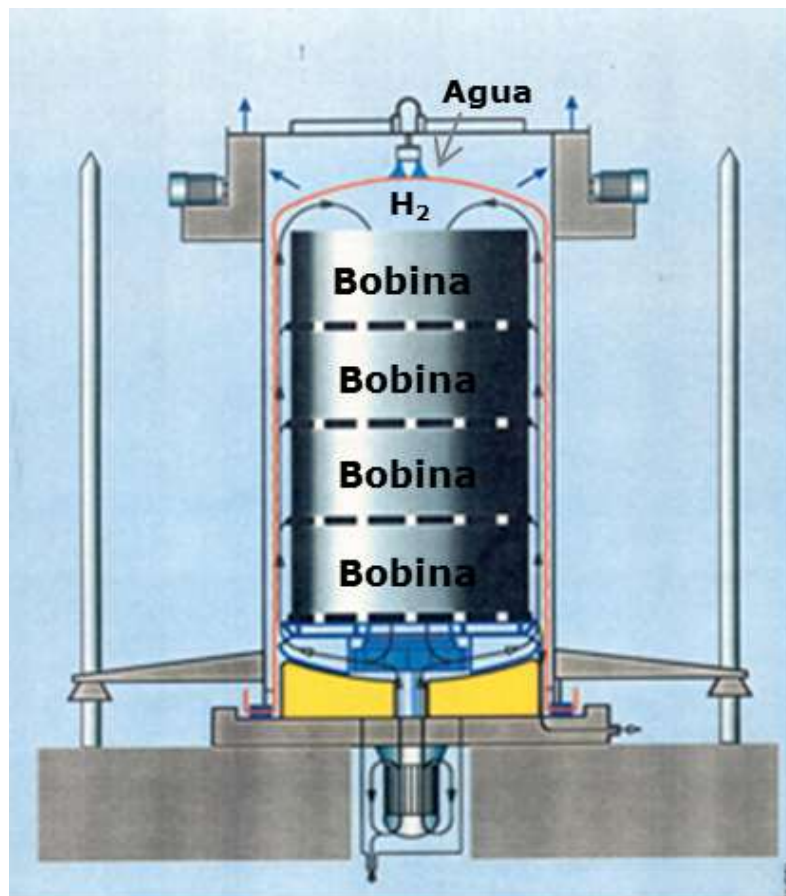


Los estudios revelan como el acero va calentado lentamente, siempre por debajo de la temperatura del gas reductor y como es necesario prolongar el tiempo de sostenimiento después de llegar a la temperatura de recrystalización para disminuir el ΔT entre el material y el gas reductor.

Una vez el calentamiento llega a su fin, el proceso es sometido a un enfriamiento con horno, durante el cual, se apaga el horno y se deja enfriar lentamente el material, siempre en presencia de hidrógeno, después la campana de calentamiento es retirada para colocar sobre la campana cobertora, la campana de enfriamiento y de esta forma dar inicio al enfriamiento.

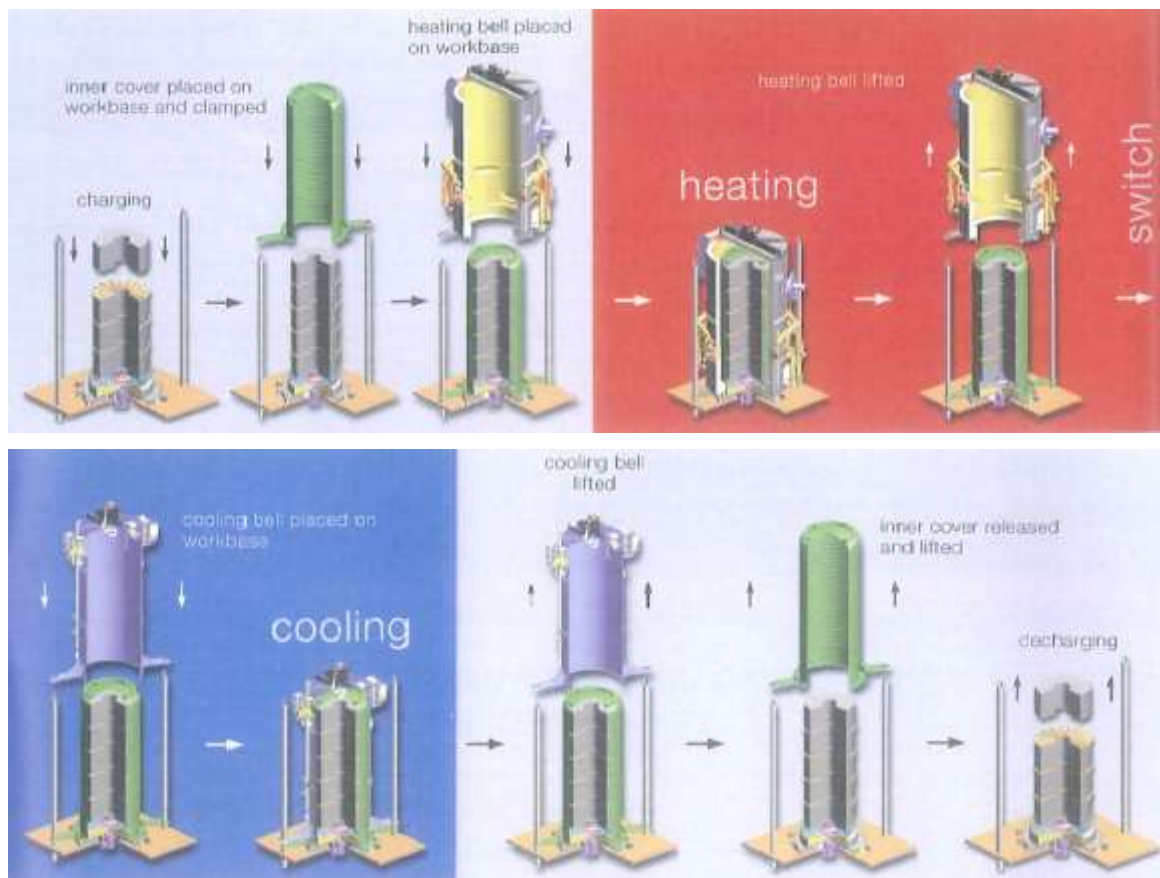
El enfriamiento tiene dos etapas, la primera en la cual solo hace el enfriamiento con dos extractores que sacan calor de la campana cobertora y la segunda etapa en la cual cuando el gas reductor del interior de la campana cobertora llega a 330 °C, inicia un enfriamiento con agua sobre la parte externa de la cobertora. Finalmente terminado el enfriamiento, se procede a realizar un barrido del hidrógeno presente en el interior de la campana cobertora con nitrógeno y de esta forma asegurar que la atmosfera presente en el interior de las bobinas, antes de quitar la cobertora sea inerte.

Figura 16. Diagrama esquemático del proceso de enfriamiento de bobinas de acero en el recocido en campana, el cual muestra las líneas de flujo del gas reductor (H_2) en el interior de la campana cobertora y la ubicación de la termocupla que controla el proceso. EBNER



A continuación se puede observar la secuencia de todo el proceso del tratamiento térmico de recocido en campana.

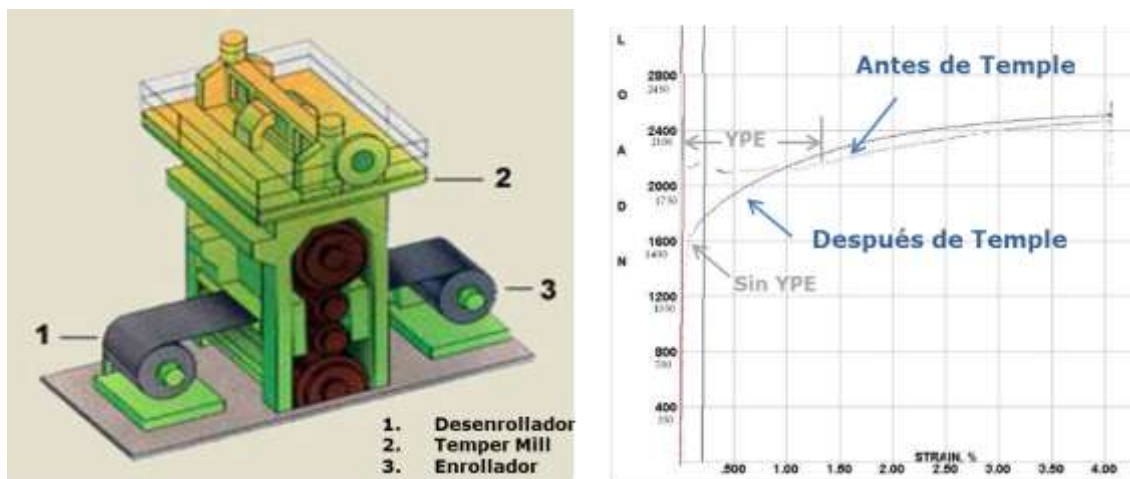
Figura 17. Secuencia del proceso industrial de Recocido en Campana para bobinas de acero laminado en frío. Publicación EBNER.



2.4. TEMPLE

Después del tratamiento térmico de recocido a las bobinas, el acero ha recuperado sus propiedades mecánicas y debe ser sometido a un proceso mecánico de formación o Temple mecánico (Temper Mill), en el cual mediante tensión y deformación se busca eliminar la inestabilidad micro estructural que se deriva por el recocido, debido a la difusión de los átomos intersticiales como el Carbono y el Nitrógeno sobre los bordes de grano que dificultan y concentran el libre movimiento de las dislocaciones y que es visible en la curva esfuerzo vs deformación.

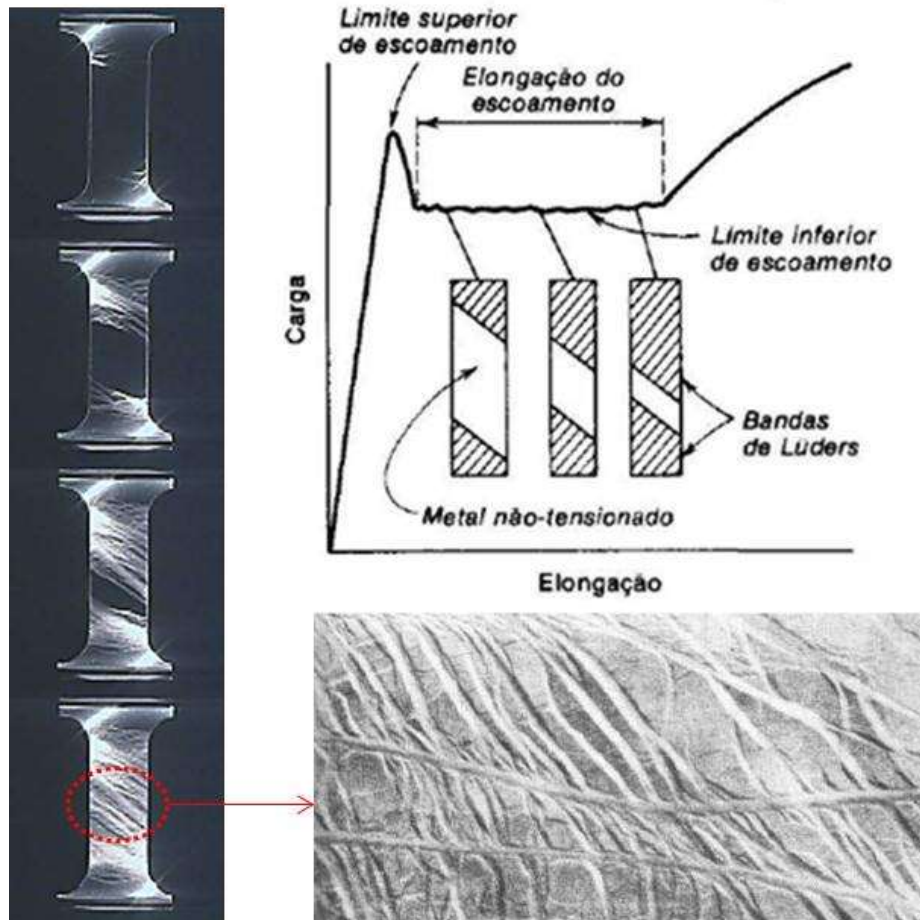
Figura 18. A la Izquierda, diagrama esquemático de un Temper Mill utilizado para templar el material después de ser recocido publicado por la U.S Steel en www.uss.com y a la derecha, la curva esfuerzo vs deformación para un acero IF de la investigación antes y después de temple, registros de ACESCO.



Si el proceso de temple no es realizado, el acero cuando es deformado, termina por sufrir un acostillamiento al momento de iniciar la deformación plástica, esta inestabilidad es conocida como las bandas de luders, elongación del punto de fluencia o palier de deformación (ver figura 19) y la deformación a la que debe ser sometido el acero, dependerá de la amplitud de la zona inestable que normalmente puede encontrarse para estos aceros desde 1 % de deformación, hasta un 3 %, esta amplitud depende del nivel de elementos intersticiales, siendo más amplio el YPE a mayor contenido de Carbono y Nitrógeno y menor en la medida que los elementos intersticiales es bajo, caso de los aceros IF libres de intersticios [13],[14].

Figura 19. Observación del fenómeno de bandas de Luders en aceros después de ser recocidos. A la Izquierda, secuencia de la deformación de un acero y aparición de las

bandas de Luders sobre su superficie en forma de acostillamiento (LUDERS BAND FORMATION IN STEEL, Mike Meier, Aaron Broumas, Octubre 9 de 2001 Department of Chemical Engineering and Materials Science University of California) y a la derecha secuencia de formación del fenómeno en el YPE con la magnificación del defecto (ANALISE NUMERICA DE BANDAS DE LUDERS de Enrique Nogueira Santana)



El nivel de temple requerido para eliminar el YPE debe ser menor a la amplitud del YPE con el fin de evitar aumentar considerablemente la fluencia final del acero, esto se puede apreciar en la gráfica 21, en la cual se muestra la relación del YPE con respecto al porcentaje de temple y la curva esfuerzo deformación para dos niveles de deformación en el temple.

Figura 20. Representación esquemática de la elongación del punto de fluencia en un diagrama esfuerzo vs deformación. Improved Criteria for Acceptable Yield Point Elongation In Surface Critical Steels, Dr. John G. Speer Dr. David K. Matlock Mr. Bryce Lakamp Dr. Rongjie Song, mayo 30 2007.

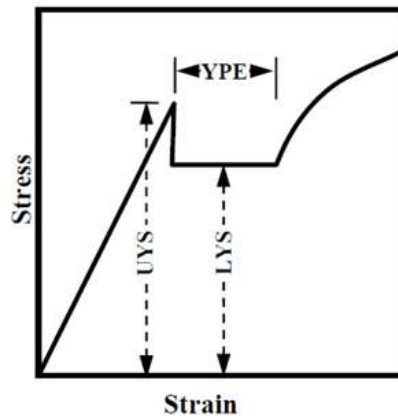
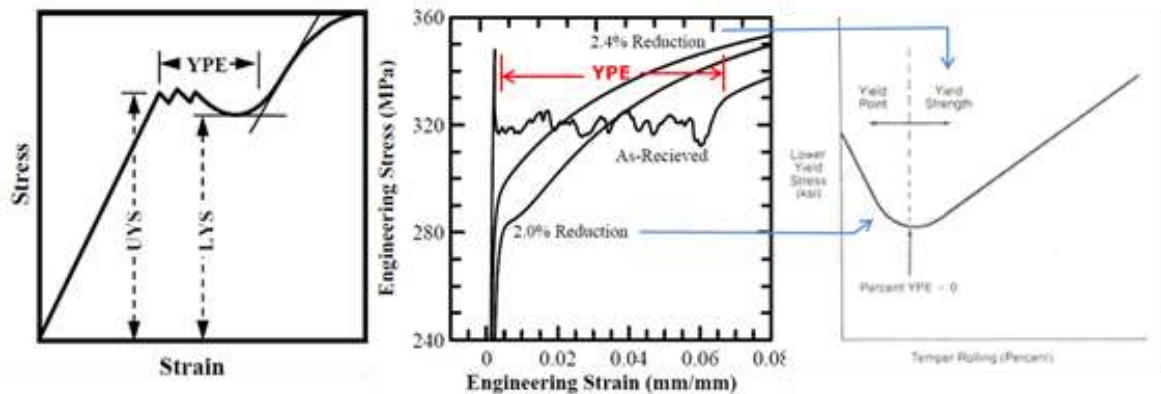


Figura 21. Representación de la elongación del punto de fluencia de acuerdo a norma ASTM E 8 vs diagrama esfuerzo deformación para una acero de bajo carbono antes y después del temple, así como la relación de la fluencia con el YPE de acuerdo a la cantidad de temple realizado, Yield Point Elongation In Surface Critical Steels, Dr. John G. Speer Dr. David K. Matlock Mr. Bryce Lakamp Dr. Rongjie Song, mayo 30 2007



2.5. ENSAYOS Y NORMAS PARA CLASIFICAR UN ACERO CON CALIDAD DE EMBUTICIÓN

Después de que el acero ha sido recocido y templado, debe ser sometido a ensayos mecánicos de laboratorio para determinar su ductilidad, ductilidad que va asociada a múltiples factores como su composición química y las distintas variables de producción que ha tenido en los procesos por los que ha pasado como laminación en caliente, laminación en frío, recocido y temple. Esta medida de ductilidad que se traduce en capacidad de deformación y que finalmente deriva la fabricación de materiales de

ingeniería más livianos y más resistentes, hace referencia a la anisotropía que presenta el material después de recocido, a su endurecimiento por deformación y a la anisotropía planar, propiedades ligadas a las propiedades mecánicas normales, como la fluencia (YP), resistencia máxima (TS) y elongación (A %).

Dentro de los parámetros de clasificación estipulados para clasificar el acero laminado en frío bajo norma ASTM A 1008 (Standard Specification for Steel, Sheet, Cold-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy and High Strength Low-Alloy Improved Formability) como acero de calidad de embutición se encuentran: la fluencia (YP), la resistencia máxima (TS), la elongación (A %), la anisotropía plástica o índice “r” y el índice de endurecimiento por deformación “n”, parámetros que son determinados por medio de ensayos fundamentales en la maquina universal de ensayos. Ver figura 22.

Figura 22. Rangos de las propiedades mecánicas que clasifican al acero laminado en frío bajo Norma ASTM A 1008 en diferentes calidades de acuerdo a su ductilidad.

Designation	Yield Strength ^C		Elongation in 2 in. [50 mm] % ^C	r_m Value ^D	n-Value ^E
	ksi	MPa			
CS Types A, B, and C	20 to 40	[140 to 275]	≥ 30	^F	^F
DS Types A and B	22 to 35	[150 to 240]	≥ 36	1.3 to 1.7	0.17 to 0.22
DDS	17 to 29	[115 to 200]	≥ 38	1.4 to 1.8	0.20 to 0.25
EDDS	15 to 25	[105 to 170]	≥ 40	1.7 to 2.1	0.23 to 0.27

^A These typical mechanical properties apply to the full range of steel sheet thicknesses. The yield strength tends to increase, the elongation decreases and some of the formability values tend to decrease as the sheet thickness decreases.

^B The typical mechanical property values presented here are nonmandatory. They are provided to assist the purchaser in specifying a suitable steel for a given application. Values outside of these ranges are to be expected.

^C Yield Strength and elongation are measured in the longitudinal direction in accordance with Test Methods A 370.

^D Average plastic strain ratio (r_m value) as determined by Test Method E 517.

^E The strain hardening exponent (n-value) as determined by Test Method E 646.

^F No typical properties have been established.

2.5.1. Propiedades mecánicas

Norma ASTM E8 “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, esta norma describe y reglamenta paso a paso el ensayo realizado en la maquina universal de ensayos para determinar las propiedades mecánicas como: la fluencia (YP), la resistencia máxima y la elongación en productos de metálicos.

Consiste en someter una probeta troquelada con dimensiones establecidas por la norma, a una carga progresiva y constante hasta que la probeta se rompe. Antes de que inicie el ensayo, se coloca sobre la probeta un equipo llamado extensómetro, que transfiere los cambios dimensionales que va sufriendo la probeta a un graficador,

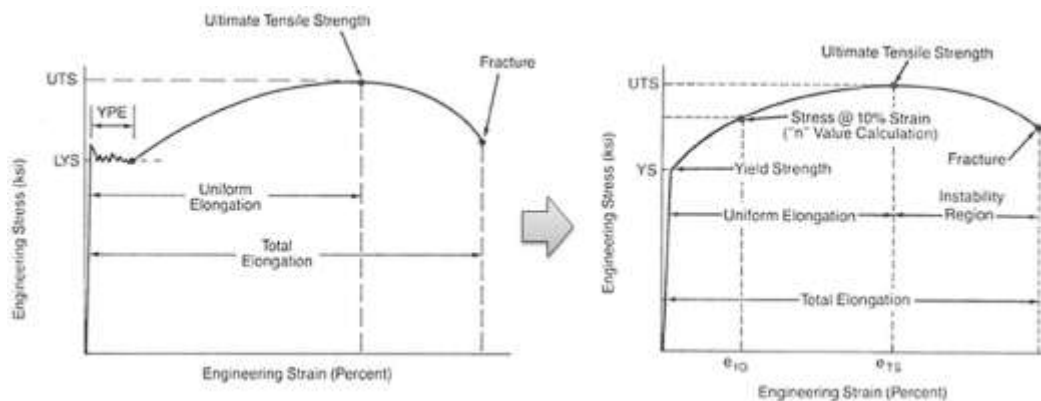
traduciendo de esta forma la deformación y la carga en una curva llamada esfuerzo vs deformación.

Figura 23. Probeta estipulada por la norma ASTM E8 para ensayo de tensión de materiales planos y maquina universal de ensayos utilizada para determinar las propiedades mecánicas por tensión uniaxial.



Esta curva nos permite conocer en el material su zona elástica, su zona plástica, su grado de ductilidad y determinar los puntos en que inicia y termina cada zona, como lo son la resistencia de fluencia (YP), la resistencia máxima (TS) y la elongación (% A), de igual forma permite predecir el comportamiento mecánico[8] que tendrá el material en sus aplicaciones, así como también, definir variables de proceso que permitan fabricar materiales aptos para la ingeniería sin presencia de defectos superficiales como el caso de las bandas de luders después de que el material ha sido recocido y templado[9].

Figura 24. Curva típica obtenida en la maquina universal de ensayos, en donde se identifican zonas y puntos que determinan la calidad y el comportamiento ingenieril de un material.



2.5.2. Anisotropía

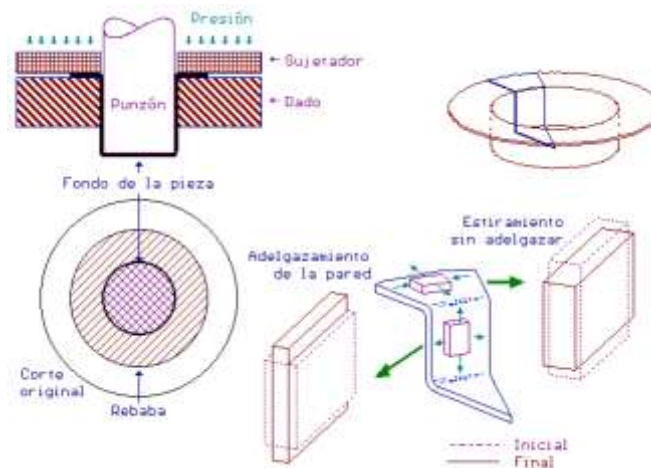
Norma ASTM E 517 “Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal”, también conocido como el coeficiente de Lankford o índice “ r ”. Este coeficiente determina cuantitativamente la anisotropía plástica en el material, característica que obedece a la capacidad que tiene el acero para moverse preferencialmente sobre sus sistemas de deslizamiento al estar sometidos a procesos de deformación como el troquelado y el embutido [3].

Figura 25. Ejemplos de piezas metálicas sometidas a procesos de embutición.



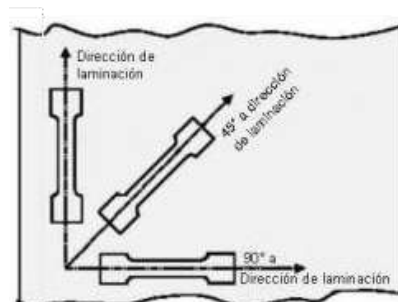
La anisotropía está altamente relacionada a la textura cristalográfica del material y guarda una fuerte dependencia de procesos como el de recristalización (tratamiento térmico). En términos de procesos de embutición, podemos definir la anisotropía plástica como una respuesta mecánica a la capacidad que tiene un material a deformarse sobre su plano de laminación sin adelgazar significativamente su espesor, es decir, la capacidad que tiene para acomodar la deformación plástica sobre su plano de laminación.

Figura 26. Diagrama esquemático del troquelado en un disco de acero con las características relevantes de la anisotropía en cada zona deformada. Formabilidad en aceros, Rafael Colás, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.



Esta característica de formabilidad en los aceros es cuantificada a través del índice r y la anisotropía planar, calculados ambos por medio del coeficiente de Lankford " r ", el cual es medido en una probeta de ensayo de tensión sobre la dirección de las fibras del material (cero grados), perpendicular a las fibras (noventa grados) y en dirección de cuarenta y cinco grados (45°), observándose asimetría en sus resultados. Los materiales con buena capacidad de embutición exhiben valores de anisotropía plástica (índice r) entre 1.8 y 2.0 y anisotropía planar (Δr) cercanos a 0, mientras que aquellos que presenten valores inferiores de anisotropía plástica y altos valores de anisotropía planar no tendrán alta capacidad de deformación [3].

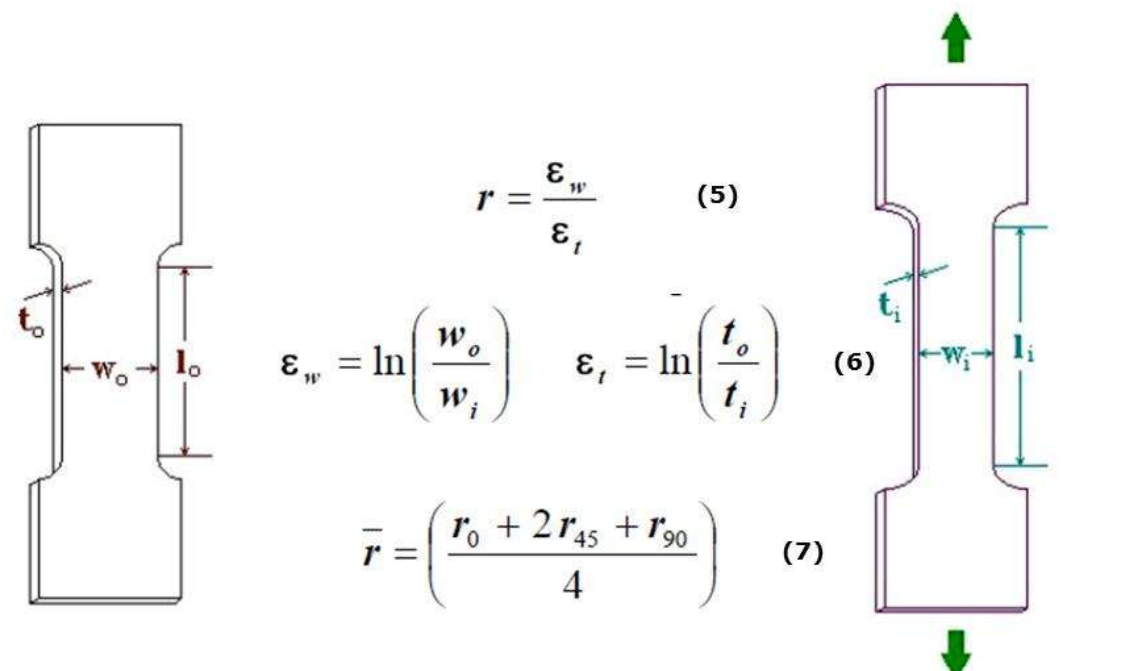
Figura 27. Diagrama esquemático del muestreo para el ensayo de tensión que se debe realizar de acuerdo a norma ASTM A 517 sobre el material a 0° , 45° y 90° de la dirección de laminación para determinación del índice r .



El índice r corresponde al cociente entre las variaciones del ancho y el espesor (5) dicho de otra forma, el cociente entre el incremento de la deformación plástica

transversal respecto el incremento en espesor durante el ensayo de tracción, lo que al final de la prueba determina la capacidad del material de estirarse sin adelgazarse, la norma ASTM A 517 sugiere que el valor r sea el valor promedio de acuerdo a la ecuación (7) de la determinación del r sobre cada sentido (0° , 45° y 90°) a la dirección de laminación, variación angular que permite evidenciar una medida del grado de anisotropía presente en el material.

Figura 28. Desarrollo aritmético para obtener el índice de anisotropía r por medio del ensayo de tracción de acuerdo a norma ASTM A 517 sobre el material a 0° , 45° y 90° de la dirección de laminación.



$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (5)$$

$$\epsilon_w = \ln\left(\frac{w_o}{w_i}\right) \quad \epsilon_t = \ln\left(\frac{t_o}{t_i}\right) \quad (6)$$

$$\bar{r} = \left(\frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}\right) \quad (7)$$

w_o : Ancho Inicial ϵ_w : Deformación en el ancho w_i : Ancho final
 t_o : Espesor inicial ϵ_t : Deformación en el espesor t_i : Espesor final

Además del índice de anisotropía plástica que se calcula en este ensayo para determinar el grado de formabilidad del acero, la norma ASTM E517 proporciona otra ecuación que permite calcular a partir de la anisotropía determinada sobre cada dirección, la tendencia que tendrá el material a la formación de orejas durante el conformado, es decir, la máxima variación de r sobre el plano de la lámina. Esta característica se denomina anisotropía planar (Δr), ver ecuación 8 y figura 29.

$$\Delta r = \left(\frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \right) \quad (8)$$

Figura 29. Diagrama esquemático de la tendencia a la formación de orejas, dependiendo del valor de anisotropía planar Δr y del valor de anisotropía en cada dirección con respecto al sentido de laminación. Microtextura aplicada ciência dos materiais, André Luis Pinto, Instituto Militar de engenharia.

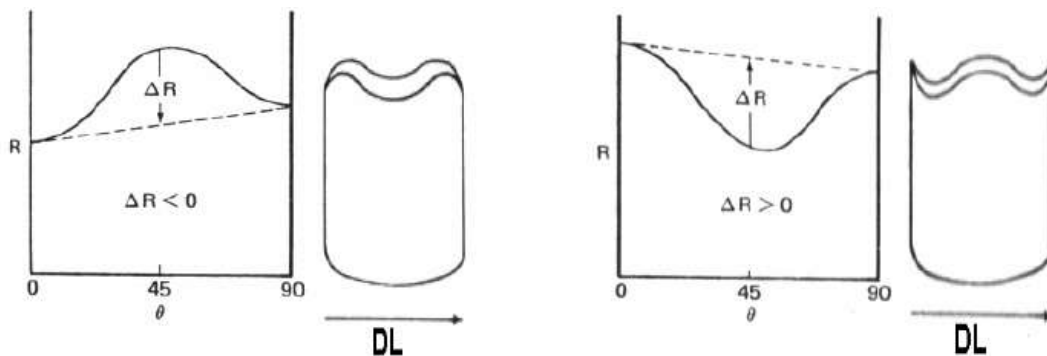
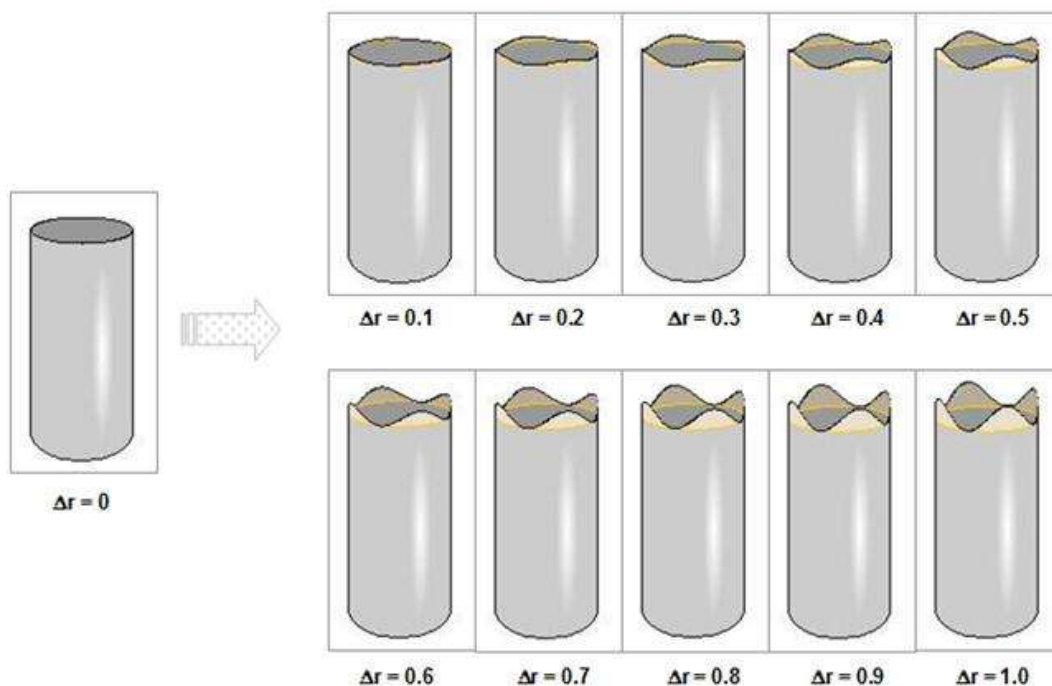


Figura 30. Diagrama esquemático de la tendencia a la formación de orejas a medida que la anisotropía planar es diferente a cero.



Resumiendo la información que permite clasificar al acero bajo Norma ASTM A 1008 como un acero de buena embutibilidad, tendremos que la anisotropía plástica o índice r , deberá encontrarse en valores mayores a 1.3 y en la medida que aumenta el valor será mejor el comportamiento durante la embutición, así también el valor de

anisotropía planar (Δr) deberá estar cercano a cero para que el material no tenga susceptibilidad a la formación de orejas después de este ser formado [3],[10].

La anisotropía depende de muchos factores, dentro de los cuales tenemos: la textura del material, el tamaño de grano, la composición química, la temperatura de embobinado en laminación en caliente, la cantidad de reducción que ha tenido el acero antes de ser recocido, la temperatura de recristalización y el tiempo de sostenimiento y la cantidad de reducción en el temple. Las gráficas a continuación muestran la dependencia que tiene la anisotropía de algunos de los anteriores factores.

Figura 31. Variación de la anisotropía con respecto a la composición química del acero en las diferentes direcciones del ensayo.

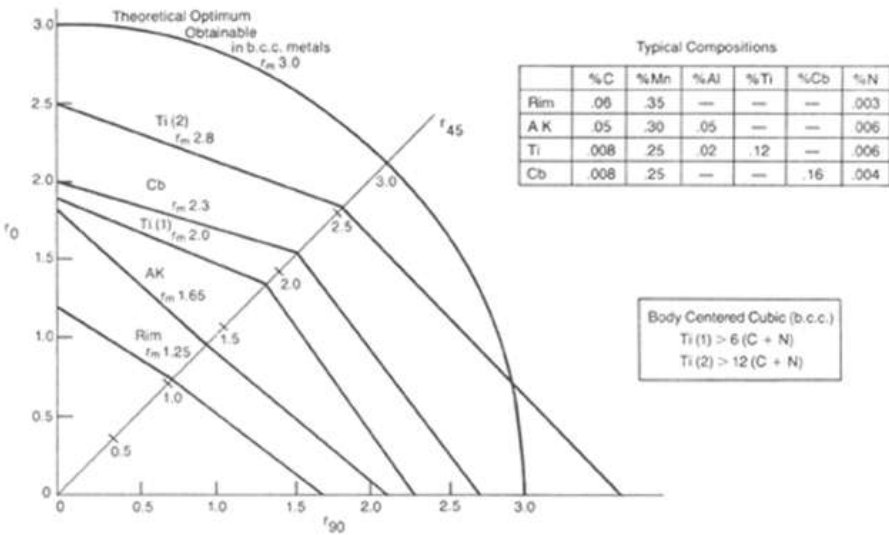


Figura 32. Variación de la anisotropía con respecto a la resistencia máxima del acero.

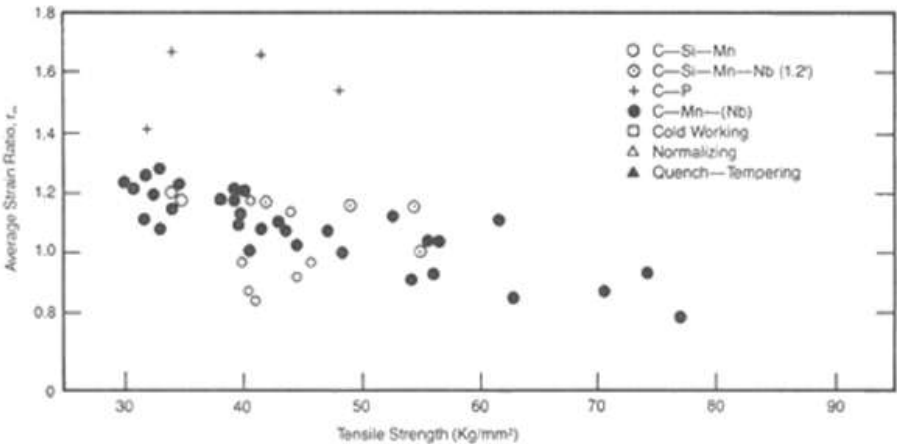


Figura 33. Variación de la anisotropía con respecto al tamaño de grano en diferentes composiciones químicas de acero.

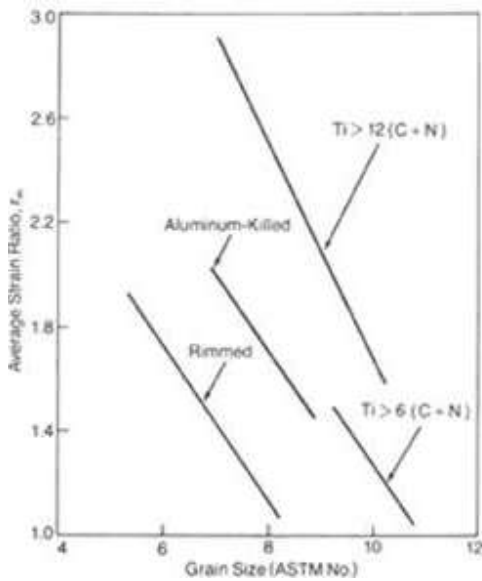


Figura 34. Variación de la anisotropía con respecto a la temperatura de embobinado en caliente del acero.

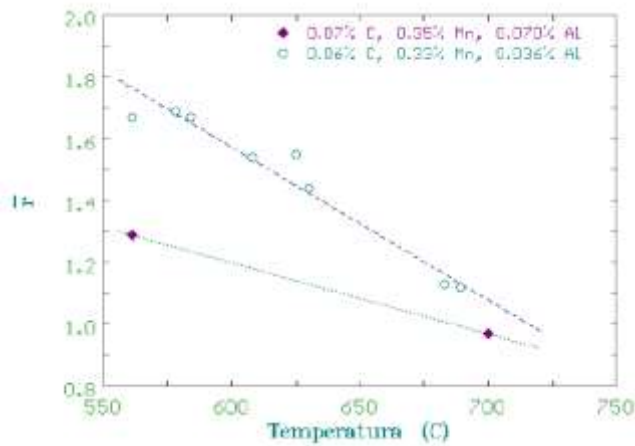
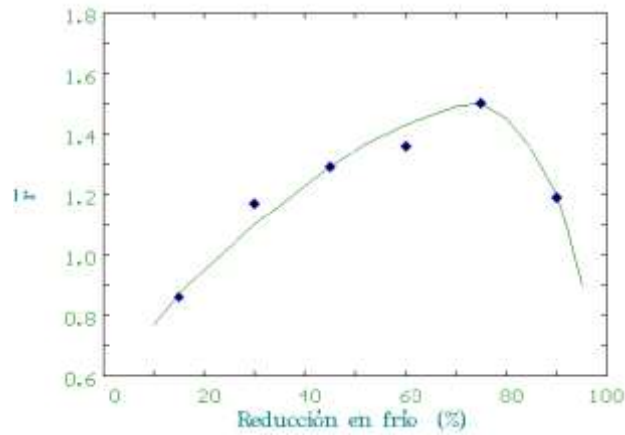


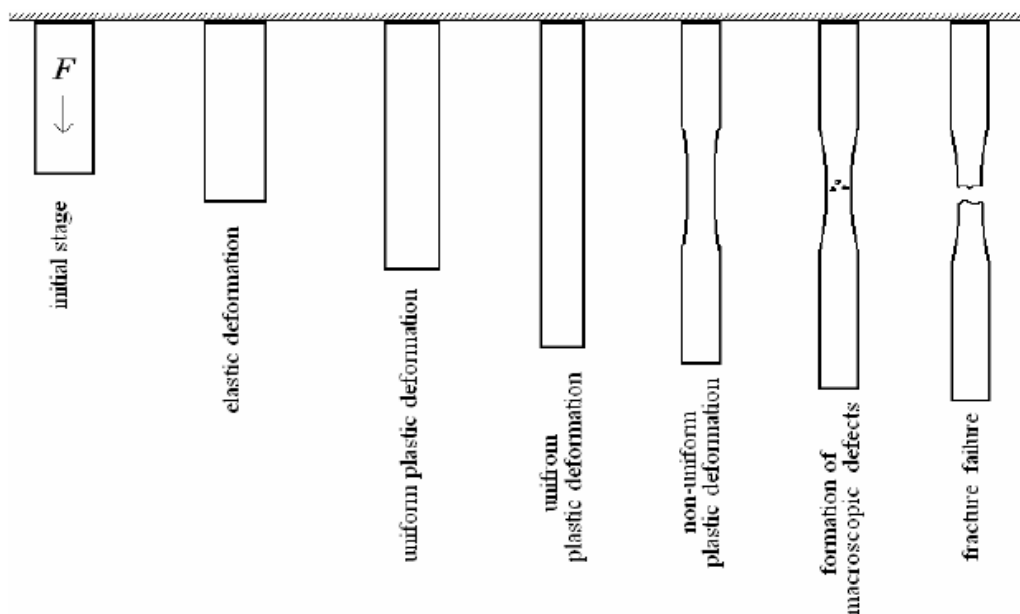
Figura 35. Variación de la anisotropía con respecto a la cantidad de reducción impartida al acero previo al recocido.



2.5.3. Endurecimiento por deformacion

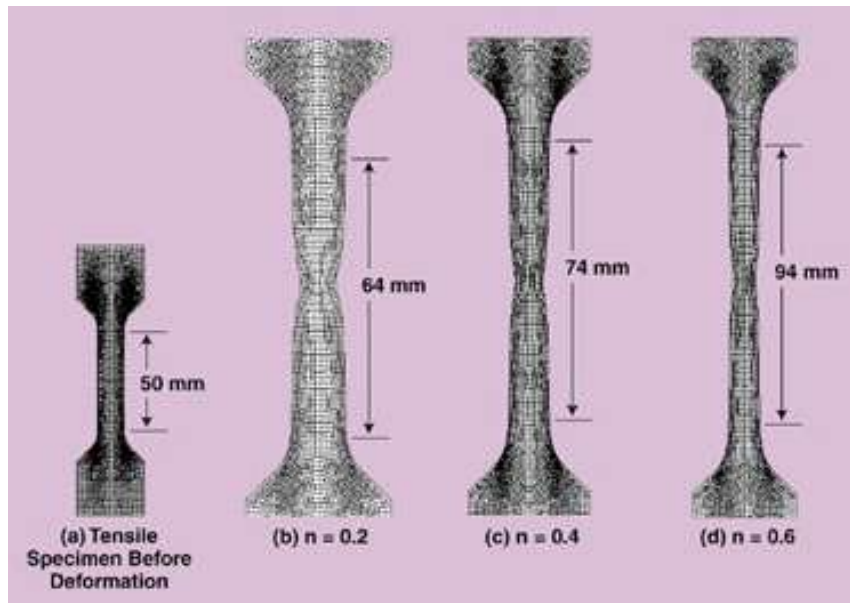
La norma **ASTM E646 “Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n -Values) of Metallic Sheet Materials”**, establece el método de ensayo para determinar el exponente n , exponente que surge de la representación de la curva esfuerzo vs deformación real una vez el material supera el esfuerzo de fluencia y sufre deformación plástica permanente sin excesivo cambio de volumen y con endurecimiento continuo debido al movimiento y reagrupamiento de las dislocaciones, causantes del fenómeno de endurecimiento y de la deformación plástica en los materiales policristalinos. El índice de endurecimiento por deformación representa la habilidad que tiene el material para distribuir uniformemente la deformación plástica en presencia de un gradiente de tensión, lo cual se relaciona con la isotropía que tenga el material y con la capacidad de estirado que pueda alcanzar sin sufrir estricción o deformación plástica no uniforme [7], [8]. ver figura 36.

Figura 36. Representación esquemática de la deformación plástica de un espécimen hasta llegar a la fractura.



A mayor índice de endurecimiento por deformación, mayor será la capacidad del material de sufrir estiramiento uniforme sin presentar cambios volumétricos en la deformación, lo cual indica que mayor será su ductilidad.

Figura 37. Diferentes índices de endurecimiento por deformación n para muestras ensayadas por tensión uniaxial.



La curva de flujo de un metal es la curva de tensión verdadera vs deformación verdadera, la cual después de superar la deformación elástica, representa el comportamiento del material en régimen plástico, la ecuación de Hollomon es una aproximación de la curva de flujo de un material en un ensayo de tracción uniaxial.

$$\sigma = k \varepsilon^n \quad (5)$$

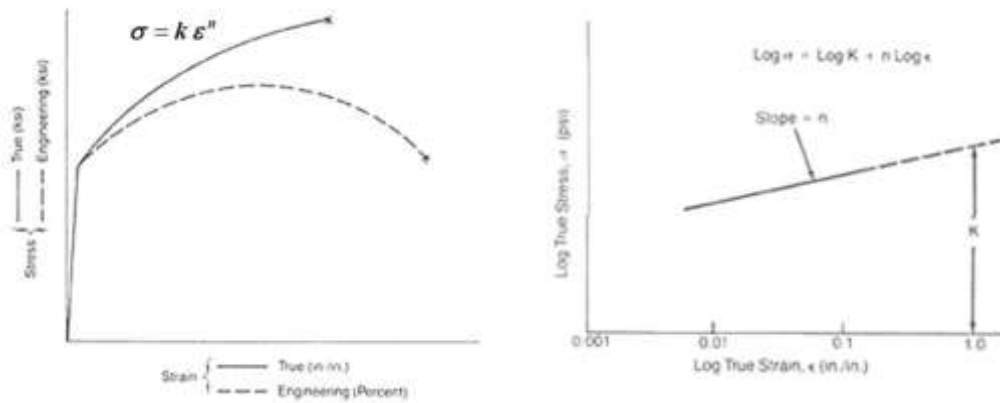
σ : Esfuerzo real ε : Deformación real k : Coeficiente de endurecimiento

n : Exponente de endurecimiento

En un gráfico doble logarítmico la ecuación de Hollomon es lineal y se expresa de acuerdo a la ecuación 6.

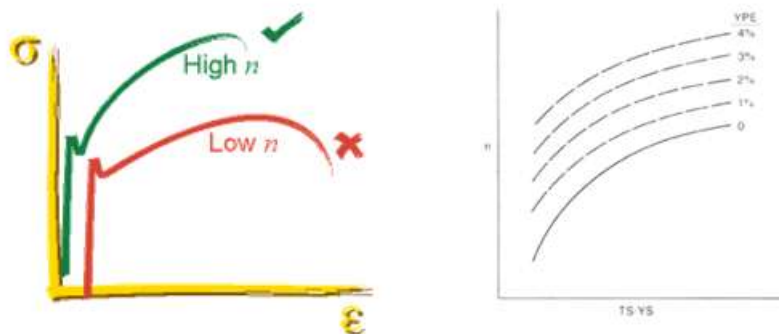
$$\log \sigma = \log k + n \log \varepsilon \quad (6)$$

Figura 38. Curva esfuerzo vs deformación real e ingenieril y pendiente para el cálculo del coeficiente de endurecimiento por deformación en un gráfico logarítmico.



El índice n es directamente proporcional a la relación del esfuerzo de tensión con el esfuerzo de fluencia, es decir que a medida que tenemos un material con una zona plástica con mayor pendiente, tendremos un índice de endurecimiento por deformación n mayor, generando mayor ductilidad en el material que se traduce en este caso como mayor capacidad de estiramiento.

Figura 39. Curva esfuerzo vs deformación ingenieril con diferentes relaciones de TS/YP y con variación directamente proporcional a la relación TS/YP.



3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

3.1. DISEÑO Y EJECUCION DE RECOCIDO PARA ACERO IF

3.1.1. Estudio de curvas de recocido y propiedades para Calidad Comercial

Con el fin de llevar a cabo el recocido en campana para una carga de acero libre de intersticios de espesor 0.60 mm cuya calidad fuera de embutición apta para el mercado de estampados, fue necesario realizar una revisión de los registros históricos de operación de recocidos de ACESCO que en su totalidad corresponden a calidad comercial y de los parámetros aconsejados por la literatura para buscar calidad embutición en recocidos de aceros de bajo carbono y aceros IF. Con esta información se diseña la primera prueba de recocido en campana para aceros IF estableciendo las variaciones que inicialmente se tendrían en temperatura de recristalización, tiempo de calentamiento, tiempo de sostenimiento y gradiente de temperatura (ΔT) de gas con respecto al material, entre un recocido para material calidad comercial y uno para calidad embutición, y teniendo en cuenta las propiedades mecánicas que se obtenían con recocido comercial y las que se tenían que buscar para asegurar calidad embutición.

Tabla 1. Protocolo del recocido de prueba con material IF para buscar calidad de embutición y del recocido que por registros históricos se hace en ACESCO para acero SAE 1006 calidad comercial.

Material	Calidad	Espesor mm	Ancho mm	Peso Carga Ton	Tiempo Recocido horas	Temperatura Recocido °C	ΔT °C
SAE 1006	CQ	0.60	1220	80 a 90	35 – 40	680	30 a 40
Prueba IF	DQ	0.60	1220	80 a 90	52 – 60	690	5 a 10

Tabla 2. Protocolo del recocido de prueba con material IF para buscar calidad de embutición y del recocido que por registros históricos se hace en ACESCO para acero SAE 1006 calidad comercial.

Material	Calidad	Temperatura Recocido °C	ΔT °C	Tiempo Recocido horas	Calentamiento Total horas	Enfriamiento Total horas
SAE 1006	CQ	680	30 a 40	35 - 40	18 - 22	17 - 18
Prueba IF	DQ	690	5 a 10	52 - 60	35 - 40	25 - 27

3.1.2. Selección del material IF

Para la prueba del recocido de acero libre de intersticios se escogió material cuyo espesor de lámina en caliente es de 3.0 mm, a continuación se describe en la tabla 3 los porcentajes de reducción y espesor que tenía cada rollo en los diferentes procesos, así como el peso por rollo y el total de la carga que será recocida.

Tabla 3. Dimensiones y peso de los rollos de acero libre de intersticios que se escogió para la prueba de caracterización y valoración del recocido en campana para obtener aceros IF con calidad de embutición.

Rollo	Ancho mm	Espesor LC mm	Espesor LF antes y después de Recocido mm	Reducción de LC a LF antes de Temple %	Peso de Rollo Kg	Peso carga Kg
97749	1220	3.000	0.615	79.5%	22355	88260
97750	1220	3.000	0.615	79.5%	20870	
97751	1220	3.000	0.615	79.5%	22895	
97752	1220	3.000	0.615	79.5%	22140	

La composición química del acero libre de intersticios de prueba de acuerdo a la literatura se clasificó como aceros libres de intersticios estabilizados con titanio, esto se deduce al encontrar titanio en exceso adicional al titanio estequiometrico que se requiere para precipitar el nitrógeno, el azufre y por supuesto el carbono como TiC. También se puede inferir con la presencia de niobio que este aleante no es relevante como estabilizador en la composición química de estos aceros, ya que el contenido necesario para actuar como elemento estabilizador es superior al que contenían. Las tablas 4 y 5 muestran la composición química de los aceros de prueba y los contenidos que dejan ver el tipo de elemento estabilizador que presentan.

Tabla 4. Composición química de los rollos de acero IF para la prueba.

Rollo	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	N	Ti
97749	0.0015	0.0050	0.1380	0.0090	0.0074	0.0260	0.0006	0.0030	0.0380
97750	0.0011	0.0050	0.1230	0.0120	0.0058	0.0370	0.0009	0.0019	0.0380
97751	0.0011	0.0070	0.1540	0.0120	0.0069	0.0360	0.0007	0.0022	0.0380
97752	0.0011	0.0070	0.1540	0.0120	0.0069	0.0360	0.0007	0.0022	0.0380

Tabla 5. Cálculo de los elementos que definen el aleante estabilizador de acuerdo a Pradhan de los aceros IF de prueba [2].

Rollo	Ti/(C+N)	Ti/C	Ti (estequiométrico)	Ti (exceso)	Nb Estabilizado	Nb/C
97749	8.44	25.33	0.027	0.011	0.012	0.400
97750	12.67	34.55	0.020	0.018	0.009	0.818
97751	11.52	34.55	0.022	0.016	0.009	0.636
97752	11.52	34.55	0.022	0.016	0.009	0.636

El contenido de Titanio y Carbono en los aceros IF de prueba, dejan ver que su comportamiento durante el recocido para facilitar y completar la recrystalización será muy bueno, de igual forma las propiedades mecánicas que se deriven del tratamiento térmico presentarán buena anisotropía y por consiguiente alta capacidad de embutición. Esto es evidenciable en la ecuación $Ti/(C+N)$ de los estudios de Pradhan [2].

3.1.3. Preparación del material IF para el recocido

El acero fue sometido al proceso de reducción, pasando de 3.0 mm de espesor inicial en lamina en caliente (LC) a 0.615 mm de espesor de Lamina en frío (LF) antes de ser recocido, aplicando un 79.5 % de reducción. Durante el proceso de reducción a los rollos se les instalaron galgas para poder incorporar las termocuplas que hacen el registro de la temperatura del material durante el tratamiento térmico, así como también se le sacaron muestras para posteriormente caracterizar el acero. La figura 40 ilustra la preparación del material que se hizo para cada recocido realizado dentro del proyecto.

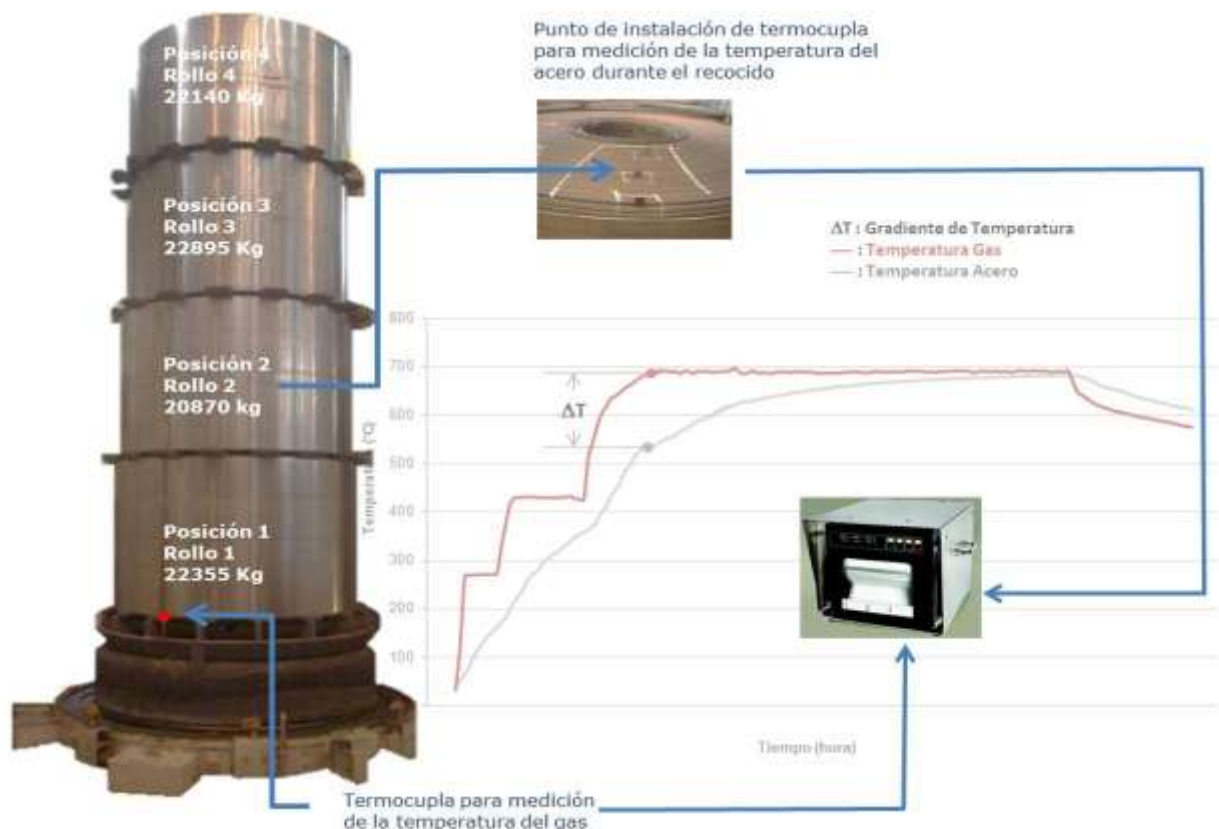
Figura 40. Rollo de prueba número 2, con las galgas instaladas para instalar la termocupla que hace el registro de temperatura durante el recocido.



3.1.4. Ejecución del tratamiento térmico de recocido para el material IF

Después del diseño de la prueba se inicia con la ejecución del tratamiento térmico de recocido de recristalización con su respectivo temple para una carga de aceros "IF", entendiéndose por carga el peso del acero ha recocer con el objetivo de obtener calidad de embutición. En este tratamiento térmico se monitorea la temperatura del acero y del gas, por medio de la instalación de termocuplas en el acero y en el punto de medición de la atmósfera, la diferencia entre estas dos temperaturas llamada gradiente de temperatura (ΔT) es la base para llegar a obtener los diferentes grados de embutición en aceros de este tipo, obteniendo un índice de anisotropía plástica mayor en la medida en que el gradiente de temperatura es menor y viceversa.

Figura 41. Esquema del montaje del recocido de acero IF, con los perfiles de temperatura esperados para el gas y el material para la posición 2, al igual que el ΔT que se busca en el tratamiento.



En este tratamiento térmico de recocido se toma como rollo referencia para la medición y construcción del perfil de temperatura y determinación del gradiente, el rollo ubicado en la posición dos de la carga, debido a que esta posición se determinó

como la posición más fría de la carga durante el recocido, resultado obtenido en la investigación desarrollada por el Ingeniero Humberto Gómez en su tesis de maestría “ESTUDIO DEL PROCESO DE RECOCIDO EN CAMPANA (BATCH ANNEALING) PARA MEJORAR LA EMBUTIBILIDAD DE ACEROS DESTINADOS A ESTAÑAR Y/O CROMAR” [11].

3.2. CARACTERIZACIÓN DEL ACERO IF RECOCIDO Y TEMPLADO Y EL ACERO SAE 1006 DDQ

Después de ser recocido el material libre de intersticios, se procedió a tomar muestras de cada uno de los 4 rollos tratados térmicamente para realizar la respectiva caracterización del material. Luego el acero IF recocido fue sometido a temple con un porcentaje de reducción del 2.44 %, pasando de un espesor de 0.615 mm a un espesor final de 0.60 mm. De igual forma después del temple se procedió a tomar muestras de los rollos para su caracterización en el laboratorio.

La designación que se le dio a cada rollo en su paso por cada proceso productivo de ACESCO, está marcado por una letra. De esta forma para el rollo que estamos caracterizando en la etapa después del temple cuyo número consecutivo es el 1, estará marcado como rollo 1AAAA. Ver tabla 6.

Tabla 6. Designación de letras para cada proceso por donde ha pasado el acero durante su transformación.

Proceso	Rollo	Designación	# Rollo	Descripción
Decapado	1	A	1 A	LC : Lamina en Caliente
Laminado	1	AA	1 AA	RFD : Rollo Frío Duro
Recocido	1	AAA	1 AAA	RFR : Rollo Frío Recocido ^a
Temple	1	AAAA	1 AAAA	RFS : Rollo Frío Suave ^b

^a Rollo de acero que ha sido recocido pero no ha pasado por el temple

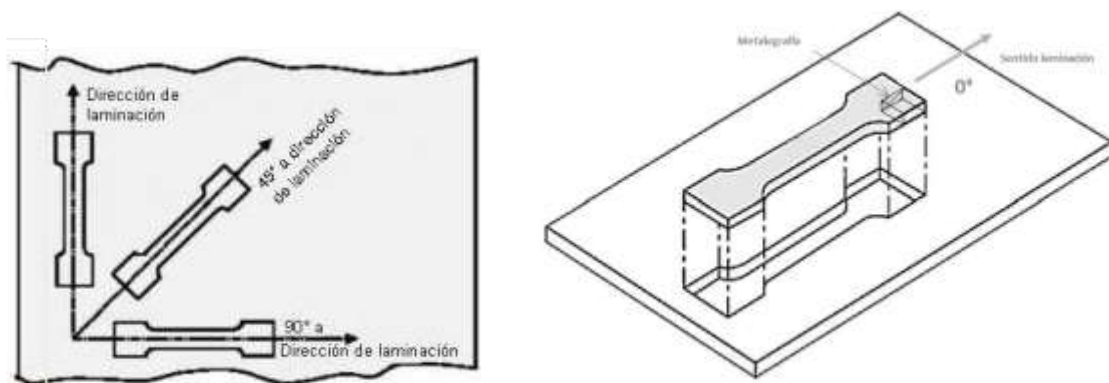
^b Rollo de acero que después de ser recocido para por el temple para eliminar el YPE

En cada uno de los procesos por los que paso cada rollo, en donde sus propiedades y dimensiones fueron afectadas, se sacaron muestras para realizar las caracterizaciones y clasificar la calidad del acero libre de intersticios estabilizado con titanio de acuerdo a la norma ASTM A 1008. Entre los ensayos de laboratorio utilizados para dicha caracterización tenemos la microscopía convencional y electrónica, los ensayos

fundamentales como el de tensión para el cálculo de la fluencia (YP), resistencia (TS), elongación y endurecimiento por deformación o índice n ; el ensayo de anisotropía plástica para el cálculo del índice de anisotropía plástica r y el índice de anisotropía planar Δr , la dureza y ensayos simulativos como el copado.

Para estos ensayos se tomaron muestras en las diferentes direcciones con respecto al sentido de laminación del acero, a 0° , 45° y 90° , como se ilustra en la figura 42.

Figura 42. Diagrama esquemático de las muestras tomadas para cada rollo en diferente sentido 0° , 45° y 90° y punto de muestreo para determinar tipo de estructura y tamaño de grano por metalografía.



Todo el proceso de caracterización que se hizo con el acero libre de intersticios utilizado en las pruebas, también se hizo para acero SAE 1006 con calidad de embutición profunda (DDQ) comercializado por la empresa ACEROS CORTADOS en espesores de 0.46 mm y 0.61 mm. Estas pruebas se hicieron con el fin de hacer una comparación entre el comportamiento mecánico que ofrece un acero SAE 1006 con respecto a un acero libre de intersticios con la misma calidad y tener una referencia de las propiedades mecánicas esperadas por la industria nacional.

Se tomaron 3 rollos de acero SAE 1006 DDQ de espesor 0.46 mm y 4 rollos de acero SAE 1006 DDQ de espesor 0.61mm, cuyas composiciones químicas se pueden ver en las tablas 7 y 8. Los registros de la composición muestran que son aceros que a diferencia de los IF, no presentan micro aleaciones que incorporen características relevantes de embutibilidad.

Tabla 7. Composición química de rollos de acero SAE 1006 DDQ espesor 0.46 mm.

Rollo No	C	Si	Mn	P	S	Al	V	Nb	Ti
11120	0.060	0.010	0.160	0.007	0.004	0.031	0.001	0.001	0.000
12063	0.040	0.023	0.150	0.008	0.006	0.050	-	-	0.000
11136	0.040	0.016	0.180	0.007	0.004	0.047	0.001	0.002	0.000

Tabla 8. Composición química de rollos de acero SAE 1006 DDQ espesor 0.61 mm.

Rollo No	C	Si	Mn	P	S	Al	V	Nb	Ti
11178	0.040	0.017	0.160	0.009	0.010	0.037	0.001	0.001	0.001
11195	0.050	0.014	0.170	0.007	0.007	0.050	0.001	0.001	0.001
11196	0.050	0.014	0.170	0.007	0.007	0.050	0.001	0.001	0.001
11204	0.050	0.019	0.190	0.013	0.008	0.043	0.001	0.001	0.001

3.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA ACEROS LIBRES DE INTERSTICIOS RECOCIDOS EN CAMPANA 100 % HIDROGENO

En este punto de la investigación, la información de la curva del recocido de la carga de prueba compuesta por aceros IF (Figura 43) y la caracterización de estos aceros y los aceros SAE 1006 DDQ comercializados en la industria nacional, genera la retroalimentación necesaria para el posterior diseño de experimentos que permita junto a la calidad encontrada en el material, validar los resultados obtenidos y medir el grado de sensibilidad del proceso y del acero, buscar repetibilidad en los resultados y optimizar las variables del tratamiento térmico para contar con herramientas que faciliten la operación sin tener que recurrir a prácticas no convencionales, como el uso a nivel industrial de termocuplas insertadas a los rollos para controlar la temperatura de las bobinas y predecir la calidad del material. Estas prácticas deben ser solo de carácter científico debido a su complejidad operacional.

Teniendo en cuenta que la disposición de material para este tipo de pruebas industriales es limitada, se decide hacer un diseño de experimento con un solo factor y 4 niveles para dicho factor. El factor que se toma para desarrollar el material calidad embutición profunda es la temperatura de recocido, variable que según la literatura y la práctica, en presencia de aceros con una composición química sin variaciones apreciables, genera diferencias apreciables en las variables de respuesta, que para el

caso del proyecto son las propiedades mecánicas que clasifican el acero como acero de embutición.

Figura 43. Curva del tratamiento térmico de recocido con monitoreo de temperatura al acero IF de la primera prueba para conocer y caracterizar el material.

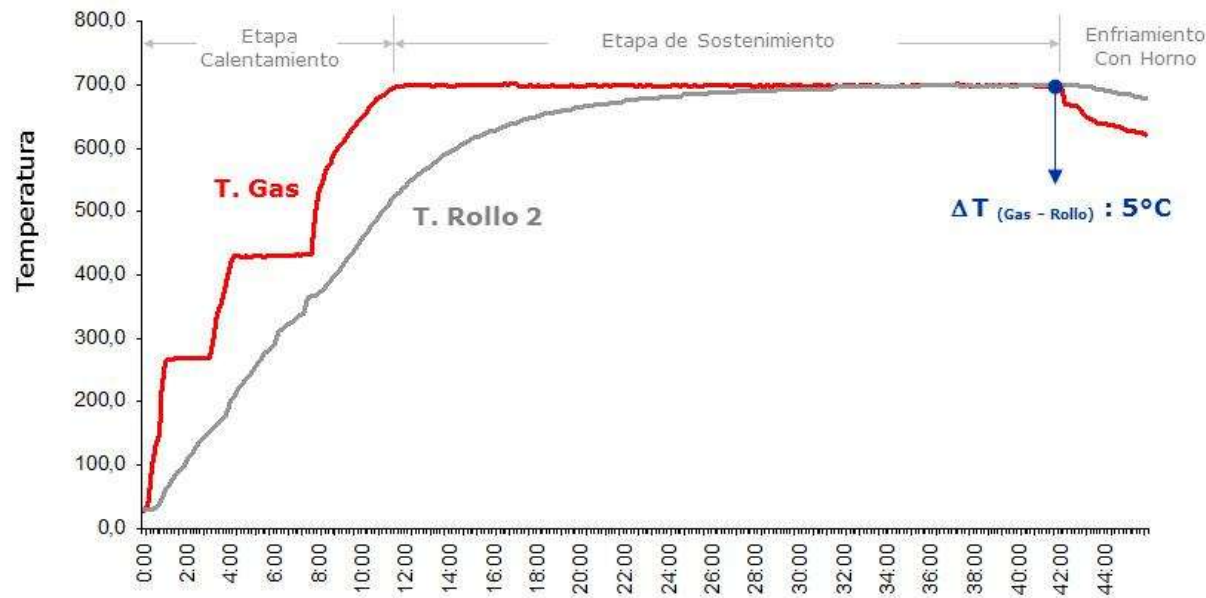


Tabla 9. Información básica del diseño de experimentos.

Factor de Diseño								
Corridas	Temperatura Sosténimiento °C	Delta Temperatura	Tiempo de Sosténimiento	Anisotropía Plástica	Endurecimiento Deformación	Fluencia Mpa	Resistencia Mpa	Elongación %
1	700	cte	cte	r	n	Yp	TS	%
2	690	cte	cte	r	n	Yp	TS	%
3	680	cte	cte	r	n	Yp	TS	%
4	670	cte	cte	r	n	Yp	TS	%
Variables de Respuesta								

Para el diseño de experimentos se hacen 3 ciclos de recocido, cada ciclo se trabaja con aceros libres de intersticios y se evalúa el factor de diseño con sus niveles en valores de carga por recocido muy similares entre ellos con ΔT de 5°C.

Con estos tratamientos térmicos y con la caracterización de las propiedades mecánicas de los aceros IF tratados y templados, se hacen los análisis de varianza para determinar la sensibilidad que tiene el factor de diseño sobre las variables de respuesta de la tabla 9.

Esta etapa del proyecto viene acompañada de un trabajo de caracterización en laboratorio y clasificación de aceros bajo normas, buscando la calidad de embutición.

Con estos análisis se busca al final del proyecto, generar la información necesaria al proceso productivo de recocido para entrar en la producción y comercialización de estos aceros, sin tener que monitorear las temperaturas de las bobinas, solo con la temperatura del gas, temperatura observable por medio del sistema supervisorio propio del proceso de recocido en campana.

4. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. RECOCIDO DE PRUEBA DE ACERO IF

A continuación se presentan los resultados obtenidos del recocido de prueba de acero IF, el cual fue planeado dentro del proyecto, con el fin de evaluar las propiedades mecánicas resultantes, frente al tratamiento térmico, específicamente, la temperatura de recrystalización, el gradiente de temperatura (ΔT) y el tiempo de recocido necesario para obtener la calidad de embutición, y frente a las propiedades mecánicas de los aceros SAE 1006 DDQ normalmente comercializados en la industria colombiana.

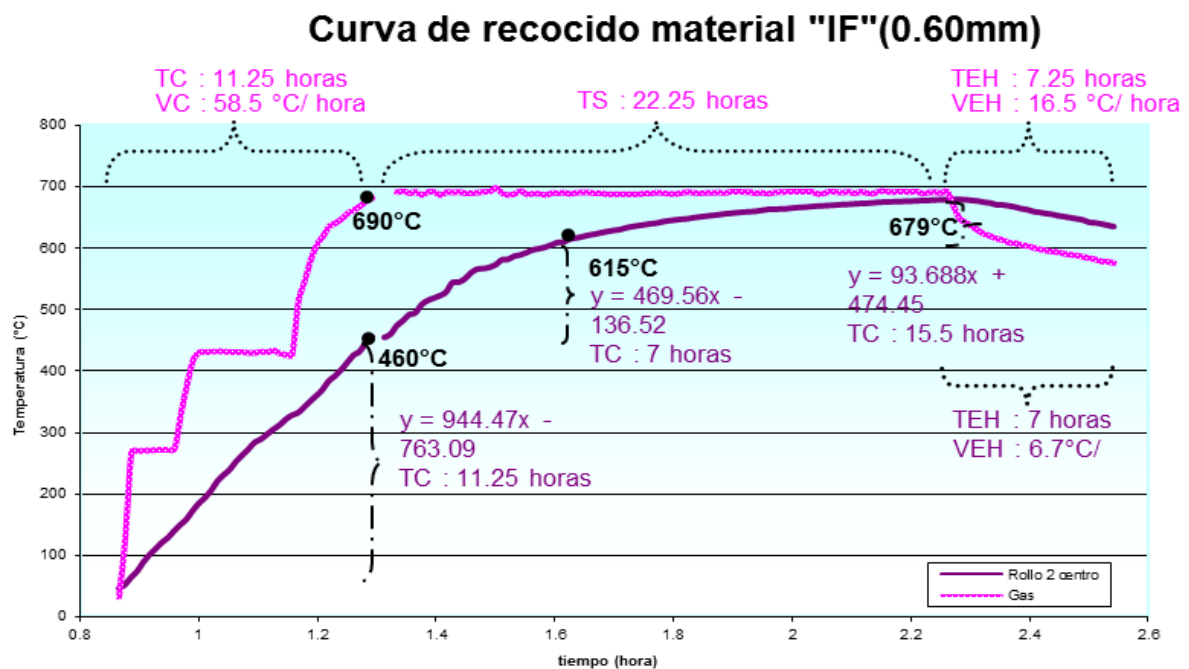
El perfil de temperatura que se observa en la figura 45, obedece al registro permanente de los valores de temperatura que se alcanzaron durante el tratamiento térmico de prueba para el rollo de acero IF cargado en la posición 2 de la carga y para el gas de la atmosfera interna del recocido. Estas mediciones se hicieron después de preparar tanto el material como el equipo para el tratamiento térmico, tal como se muestra en la figura 44.

Figura 44. Registro fotográfico de los puntos más relevantes del proceso de preparación y del recocido de los aceros IF de prueba.

- 1: Cargue de los rollos e instalación de las termocuplas en cada rollo.
- 2: Instalación de termocupla de respaldo para la atmosfera interna.
- 3: Sellado del flanche por donde salen las termocuplas hacia el registrador.
- 4: Conexión y registro de termocuplas en sistema adquisición de datos.
- 5: Fin del calentamiento del recocido de prueba con acero IF.



Figura 45. Curva de temperatura vs tiempo, obtenida en el recocido de prueba para el rollo IF en la posición 2 y el gas de la atmosfera interna del tratamiento térmico.



La curva evidencia la diferencia marcada que hay entre la velocidad de calentamiento del acero IF y la velocidad de calentamiento del gas en las 11 primeras horas del recocido. Mientras que el gas calienta a una velocidad de 58°C/hora, el material lo hace a razón de 40 °C/hora, llegando a un gradiente de temperatura ΔT para este momento de 230°C. Cuando el gas completa las primeras 20 horas de calentamiento y se encuentra después de 9 horas a la temperatura de 690°C, temperatura programada para el recocido, el acero se encuentra en una temperatura de 655°C, lo que indica que para este momento el gradiente ΔT es de 35°C, suficiente para obtener aceros de calidad comercial de acuerdo a registros históricos. Teniendo en cuenta que en este punto al recocido de prueba le faltaban aún 11 horas para alcanzar el gradiente de temperatura ΔT programado de 10°C, se determina que para este peso de carga, la velocidad de calentamiento a partir del tiempo de calentamiento en que se obtiene calidad comercial, hasta el punto en que se obtiene el ΔT programado es de 2.2 °C/hora. En esta zona del calentamiento en donde la inercia térmica en el acero es baja, la curva se puede ajustar a una recta, generando información útil para otras campañas.

Después de que el recocido de prueba alcanzó el gradiente de temperatura ΔT deseado (10°C), fue necesario aplicar un enfriamiento con horno mucho más largo, a

diferencia de los recocidos para calidad comercial, debido a que el acero queda susceptible a sufrir micro soldaduras si este entra en la etapa de cambio de campana horno por campana de calentamiento con una temperatura de gas por encima de 580°C, la diferencia en tiempo durante esta etapa fue de 5 horas con respecto al recocido de calidad comercial. Esta etapa se puede visualizar en la figura 44 – 5.

Se encontró que para alcanzar la calidad de embutición de acuerdo a la norma ASTM A 1008 para una carga de acero IF de 86 Toneladas, fue necesario aumentar el tiempo de calentamiento del recocido entre 16 a 18 horas con respecto a los registros históricos de recocidos para calidad comercial, pasando de 22 horas de calentamiento para calidad comercial a 40 horas para calidad embutición de aceros IF, ver tablas 1 y 2.

Los resultados del tratamiento térmico de prueba para aceros IF se resumen en la tabla 10, en donde se observa que las propiedades mecánicas obtenidas después del temple, clasifican a los aceros IF de prueba como aceros calidad embutición DQ y calidad embutición profunda DDQ de acuerdo a la norma ASTM A 1008.

Tabla 10. Información básica del tratamiento de recocido de prueba con las propiedades mecánicas obtenidas en los aceros IF después de aplicar 2.44 % de reducción en el proceso de temple.

Rollo	RECOCIDO			PROPIEDADES MECANICAS DESPUES DE TEMPLE				
	Temperatura (°C)	Tiempo para alcanzar Temperatura (horas)	Tiempo Total Calentamiento (horas)	ΔT (°C)	Fluencia (MPa)	Elongación (%)	r^{20}_m	n
Gas	690	11.25						
97749AAAA (1)	679	33.50	40.75	11	186	43.2	1.81	0.21
97750AAAA (2)	680	33.50	40.75	10	202	45.0	1.82	0.20
97751AAAA (3)	681	33.50	40.75	9	200	38.8	1.78	0.20
97752AAAA (4)	681	33.50	40.75	9	203	37.4	1.98	0.19
ASTM A 1008 DQ					150 a 240	> 36	1.3 a 1.7	0.17 a 0.22
ASTM A 1008 DDQ					115 a 200	> 38	1.4 a 1.8	0.20 a 0.25

4.2. CARACTERIZACION DE ACERO IF DE PRUEBA Y SAE 1006 DDQ

Una vez realizado el recocido de prueba de los aceros IF para determinar la temperatura y el gradiente de temperatura ΔT en que se debe mover el diseño de experimentos, con el fin de obtener la sensibilidad de las propiedades mecánicas con

respecto a la temperatura de recristalización, se inició con el proceso de caracterización de los aceros libres de intersticios estabilizados con titanio sometidos al recocido y los aceros SAE 1006 DDQ comercializados en la industria nacional, cuyas identificaciones y composición química se encuentran registradas en las tablas 4, 7 y 8.

Los ensayos incluyen pruebas fundamentales para determinar propiedades mecánicas, anisotropía plástica o índice r , anisotropía planar Δr , índice n , pruebas simulativas como copado y caracterización microestructural.

4.2.1. Determinación de los índices de anisotropía plástica “ r ” y anisotropía planar Δr

Teniendo en cuenta que la investigación busca proporcionarle a un acero libre de intersticios una alta capacidad de deformación y embutición, es decir, producir un acero calidad DQ de acuerdo a norma ASTM A 1008. Es necesario entender que la anisotropía está altamente relacionada a la textura cristalográfica del material, a la composición química y guarda una fuerte dependencia de procesos como el de recristalización (tratamiento térmico) y el temple. En términos de procesos de embutición, podemos definir la anisotropía plástica como una respuesta mecánica a la capacidad que tiene un material a deformarse sobre su plano de laminación sin adelgazar significativamente su espesor, con otras palabras, la capacidad que tiene para acomodar la deformación plástica sobre su plano de laminación.

Durante el conformado del material, hay una tendencia de los aceros a formar orejas o irregularidades que saltan a la vista y que pueden ser detectadas, cuantificadas y predecidas con el cálculo de la anisotropía planar.

Estos dos parámetros fueron calculados por medio de la maquina universal de ensayos Tinus Olsen del laboratorio de ACESCO (figura 23), de acuerdo a la norma ASTM E 517, utilizando las ecuaciones 6, 7 y 8. La figura 46 muestra un ejemplo del cálculo realizado en Excel para uno de los rollos de prueba sometido al ensayo de tensión.

Figura 46. Ejemplo del cálculo de anisotropía plástica y planar para uno de los rollos de acero IF después de obtener la información del ensayo de tensión.

Wo: Ancho inicial Lo: Longitud inicial ro 20: Índice r al 20% Δr: tendencia a formar orejas (deformación no uniforme)
Wf: Ancho final Lf: Longitud final rm 20: valor promedio de r, obtenido en 3 direcciones (0°, 45°, 90°)

Bobina	Dirección (°)	Wo (mm)	Wf (mm)	Lo (mm)	Lf (mm)	r_{0}^{20}	r_{m}^{20}	Δr
97749AAA	0	12.675	11.327	51.03	61.83	1.4138	1.35	0.09
	90	12.671	11.352	51.05	61.73	1.3733		
	45	12.669	11.338	51.21	62.29	1.3079		
97749AAAA	0	12.676	11.227	51.46	62.24	1.7643	1.83	0.40
	90	12.659	11.104	50.22	60.62	2.2934		
	45	12.658	11.552	50.96	59.07	1.6254		

$$r = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w}\right)}{\ln\left(\frac{(l \times w)}{(l_0 \times w_0)}\right)}$$

$$\bar{r} = \left(\frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}\right)$$

$$\Delta r = \left(\frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2}\right)$$

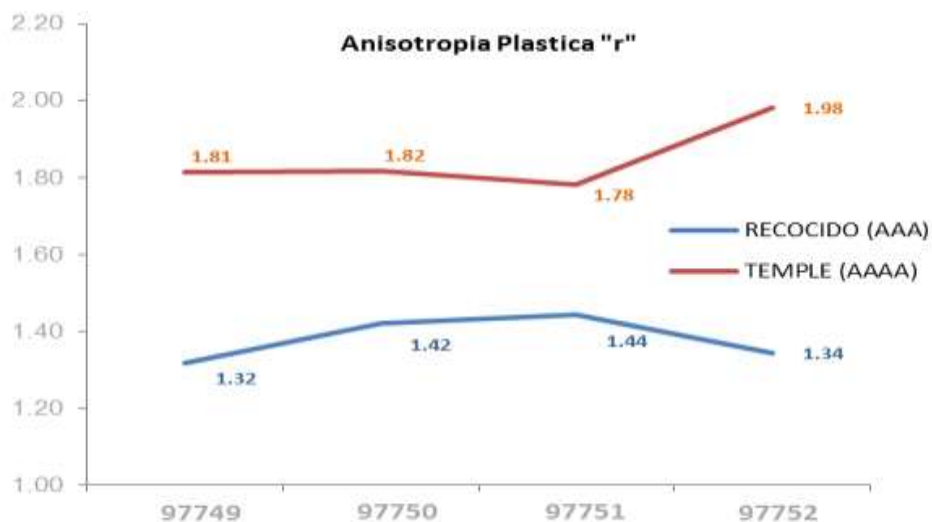
Los aceros libres de intersticios estabilizados con titanio que fueron recocidos a 690°C con un ΔT de 10°C, de acuerdo a la curva de recocido de la figura 45 y que posteriormente fueron sometidos a un proceso de temple del 2.44 %, arrojaron valores de anisotropía plástica r completamente diferentes en cada etapa de la prueba. Esto se puede ver en la tabla 11 y figura 45, en donde la anisotropía plástica de los aceros libres de intersticios después de ser recocidos presentan menores valores de r en cada uno de los ángulos del ensayo (0°, 45° y 90°) y en el cálculo final que tiene en cuenta los ángulos observados. Mientras que en la anisotropía angular y promedio calculada para estos mismos aceros pero después del temple, son definitivamente más altos, ver tabla 11 y figura 47.

También se puede observar que tanto para el acero IF recocido y el sometido a temple, la anisotropía medida sobre la perpendicular al sentido de laminación es mayor que las medidas a 0° y 45°.

Tabla 11. Índice de anisotropía plástica r calculado en los aceros IF de prueba, después de recocido y después de 2.44 % de temple.

Rollos	RECOCIDO (AAA)					TEMPLE (AAAA)		
	r^{20}_0	r^{20}_{45}	r^{20}_{90}	r^{20}_m	r^{20}_m	r^{20}_0	r^{20}_{45}	r^{20}_{90}
97749	1.33	1.30	1.35	1.32	1.81	1.71	1.62	2.31
97750	1.50	1.20	1.78	1.42	1.82	1.74	1.65	2.23
97751	1.29	1.40	1.68	1.44	1.78	1.62	1.70	2.11
97752	1.36	1.28	1.45	1.34	1.98	1.68	1.93	2.39
ASTM A 1008 DQ				1.3 a 1.7				

Figura 47. Gráfica comparativa del índice de anisotropía plástica r , después del recocido de prueba y después del temple.



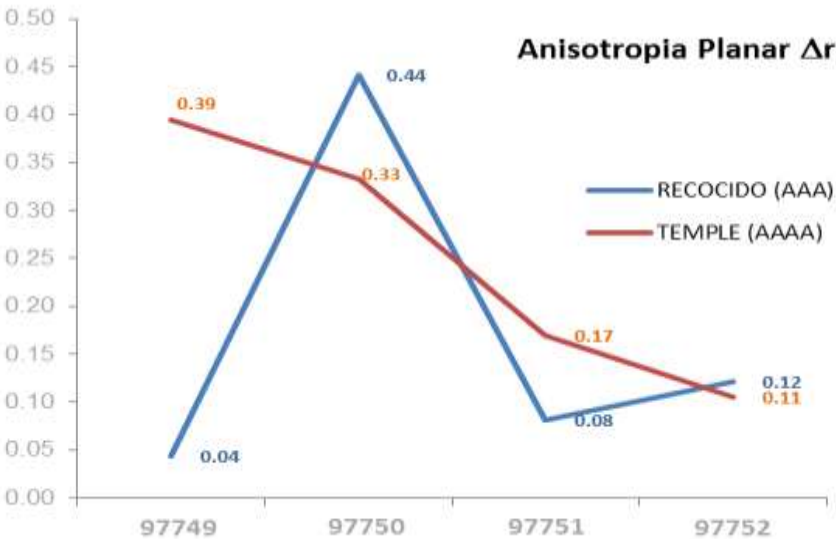
Los valores de anisotropía planar encontrados en el acero IF recocido, tienden a ser valores bajos y cercanos a cero, a diferencia del acero después de ser templado. Esto deduce que este tipo de acero después de templar tenga mayor susceptibilidad a la formación de orejas o deformación irregular que antes de ser templado. Ver tabla 12 y figura 48.

Teniendo en cuenta los valores de anisotropía plástica y planar obtenidos después de la prueba, podemos deducir que la presencia de inestabilidad o elongación del punto de fluencia, es una causante para que la anisotropía planar y la anisotropía plástica sean inferiores a la observable en los aceros IF templados. Se podría pensar que la anisotropía planar por ser cercana a cero en los aceros recocidos sin temple sería beneficioso para la formación, pero el punto relevante, es que esta tendencia a formar orejas se minimiza debido a que la inestabilidad o elongación del punto de fluencia durante la formación, absorbe la deformación irregular, generando problemas de superficie como la piel de naranja. En contravía a lo anterior, si es beneficioso el temple del acero después de ser recocido, debido a que este elimina la elongación del punto de fluencia o inestabilidad de la zona elástica, permitiendo que el acero pueda deformarse y distribuir homogéneamente la deformación plástica y esto se refleja en que la anisotropía plástica es mayor. Ver tabla 12 y graficas 48, 51 y 52.

Tabla 12. Índice de anisotropía planar Δr calculado en los aceros IF de prueba, después de recocido y después de 2.44 % de temple.

Rollos	Δr	
	RECOCIDO (AAA)	TEMPLE (AAAA)
97749	0.04	0.39
97750	0.44	0.33
97751	0.08	0.17
97752	0.12	0.11

Figura 48. Gráfica comparativa del índice de anisotropía plánar Δr , después del recocido de prueba y después del temple.



Cuando se tabulan los datos obtenidos para los aceros SAE 1006 DDQ comercializados en el país y tomados como referencia para evaluar el recocido del acero IF buscando calidad de embutición, se evidencian diferencias marcadas entre estos aceros y los aceros libres de intersticios estabilizados con titanio, diferencias que favorecen el comportamiento durante la deformación de los aceros IF, a pesar de que ambos tipos de aceros exhiben buenas propiedades ante la deformación. Se reafirma la literatura y se interpretan las bondades que genera sobre los procesos de deformación, el hecho de tener la red cristalina libre de intersticios, gracias a la adición de micro aleantes como titanio durante el proceso de fabricación del acero, de esta

forma se consolida la teoría que habla de que la anisotropía plástica y planar, están fuertemente ligadas a la textura del material.

Las tablas 13, 14 y 15 y las figuras 49, 50, 51, 52, 53 y 54, muestran las diferencias a favor de los aceros IF estabilizados con Titanio con respecto a los aceros SAE 1006 DDQ en lo que tiene que ver con la anisotropía del material. La anisotropía plástica de estos aceros IF recocidos a 690 °C con gradiente ΔT de 10° fue mayor, lo cual determina buenas características de embutición y la anisotropía planar es menor, cercana a cero, lo que deriva a una baja tendencia a la formación de orejas.

Tabla 13. Índice de anisotropía plástica y anisotropía planar Δr calculado para los aceros SAE 1006 de espesor 0.60 mm calidad DDQ.

Rollos	r^{20}_0	r^{20}_{45}	r^{20}_{90}	r^{20}_m	Δr
11178	1.98	1.42	1.96	1.70	0.55
11195	1.82	1.44	2.20	1.73	0.57
11196	1.91	1.37	2.04	1.68	0.60
11204	1.32	1.14	1.67	1.32	0.36

Tabla 14. Índice de anisotropía plástica y anisotropía planar Δr calculado para los aceros SAE 1006 de espesor 0.45 mm calidad DDQ.

Rollos	r^{20}_0	r^{20}_{45}	r^{20}_{90}	r^{20}_m	Δr
11120	1.53	1.34	1.42	1.41	0.14
12063	1.55	1.37	1.85	1.53	0.33
11136	1.50	1.28	1.90	1.49	0.42

Tabla 15. Tabla comparativa del Índice de anisotropía plástica y anisotropía planar Δr calculado para los aceros de prueba IF y SAE 1006 de espesor 0.61 mm calidad DDQ.

Rollos	ACERO IF PRUEBA 0.60 mm				SAE 1006 DDQ 0.60 mm				Rollos
	r^{20}_0	r^{20}_{45}	r^{20}_{90}	r^{20}_m	r^{20}_m	r^{20}_0	r^{20}_{45}	r^{20}_{90}	
97749	1.71	1.62	2.31	1.81	1.70	1.98	1.42	1.96	11178
97750	1.74	1.65	2.23	1.82	1.73	1.82	1.44	2.20	11195
97751	1.62	1.70	2.11	1.78	1.68	1.91	1.37	2.04	11196
97752	1.68	1.93	2.39	1.98	1.32	1.32	1.14	1.67	11204
ASTM A 1008 DQ				1.3 a 1.7		ASTM A 1008 DQ			
ASTM A 1008 DDQ				1.4 a 1.8		ASTM A 1008 DDQ			

Figura 49. Gráfica comparativa del índice de anisotropía plástica para los aceros IF de 0.60 mm de espesor, SAE 1006 DDQ de 0.60 mm y 0.45 mm.

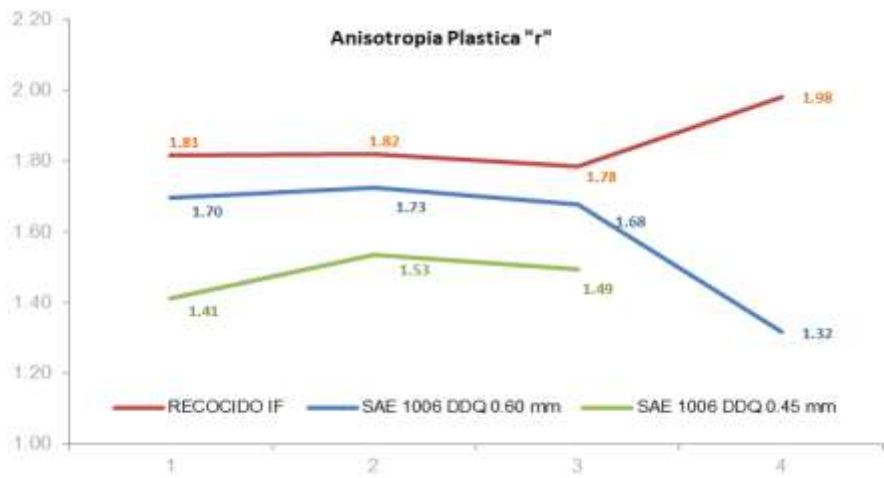


Tabla 16. Tabla comparativa del Índice de anisotropía planar Δr calculado para los aceros de prueba IF y SAE 1006 calidad DDQ de espesor 0.60 mm.

Rollos	Δr		Rollos
	ACERO IF PRUEBA 0.60 mm	SAE 1006 DDQ 0.60 mm	
97749	0.39	0.55	11178
97750	0.33	0.57	11195
97751	0.17	0.60	11196
97752	0.11	0.36	11204

Figura 50. Gráfica comparativa del índice de anisotropía planar calculado para los aceros IF y SAE 1006 calidad DDQ de espesor 0.60 mm.

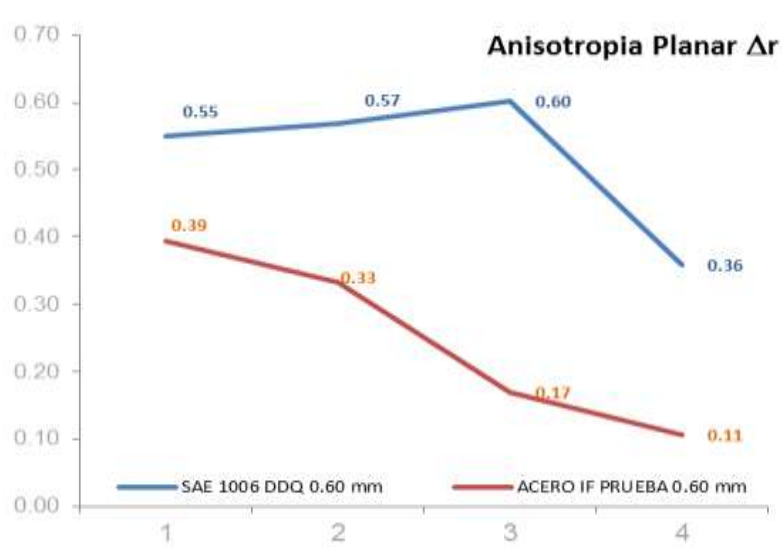


Figura 51. Gráficas comparativas del índice de anisotropía plástica y planar calculado para los aceros IF de prueba después del recocido.

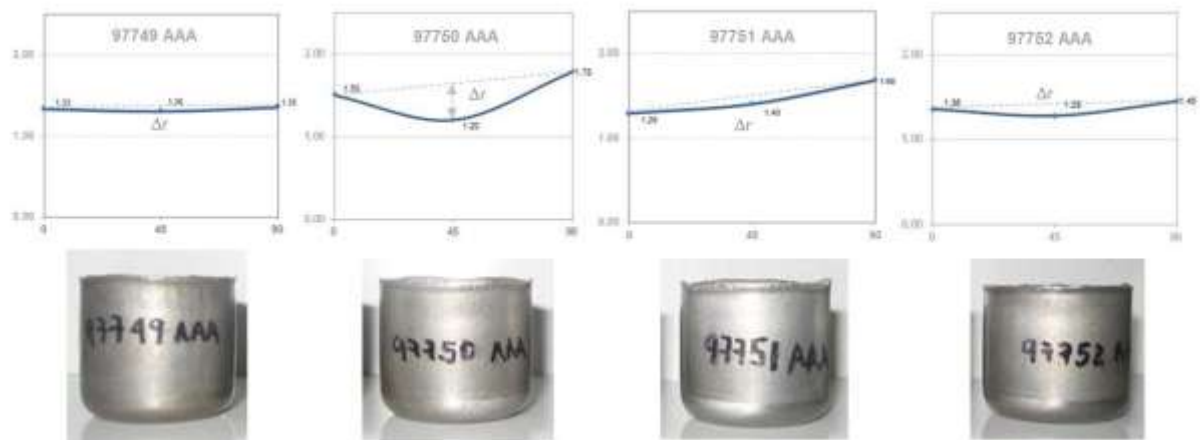


Figura 52. Gráficas comparativas del índice de anisotropía plástica y planar calculado para los aceros IF de prueba después de temple.

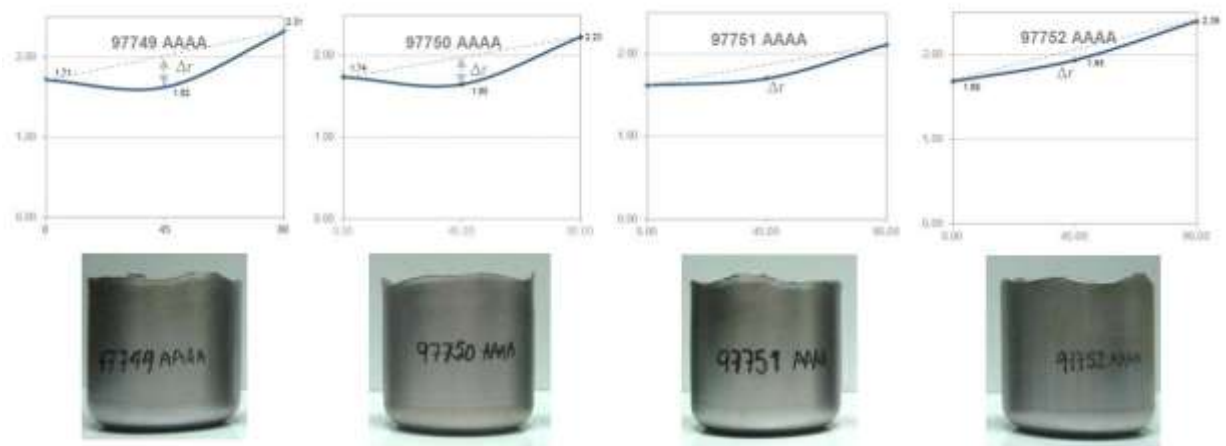


Figura 53. Gráficas comparativas del índice de anisotropía plástica y planar calculado para los aceros SAE 1006 DDQ de espesor 0.60 mm.

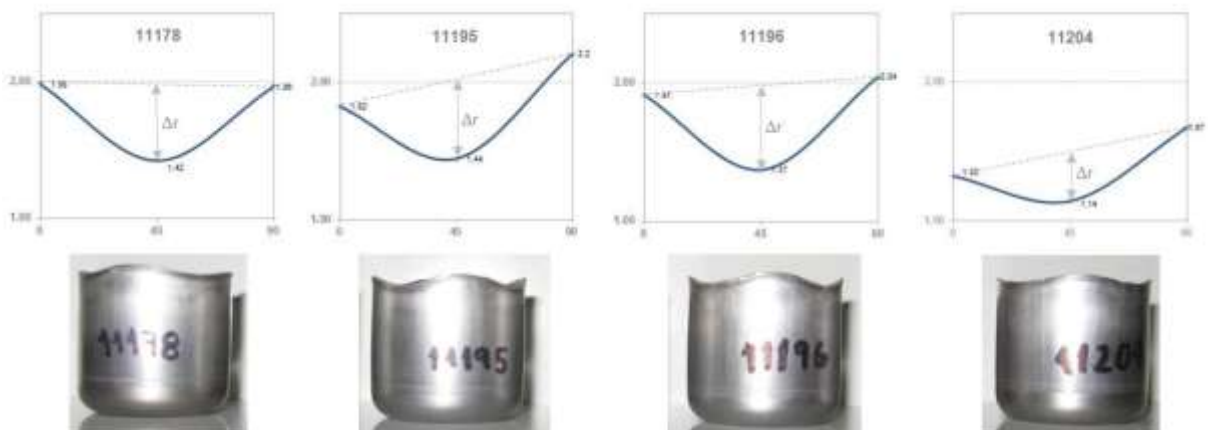
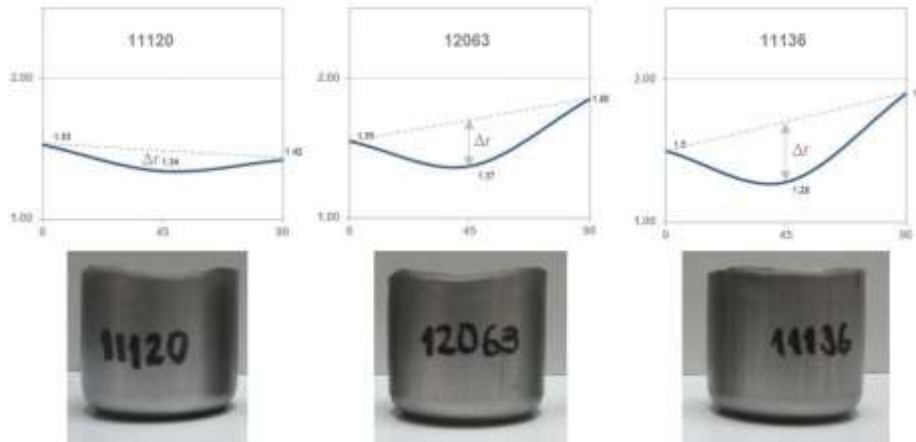
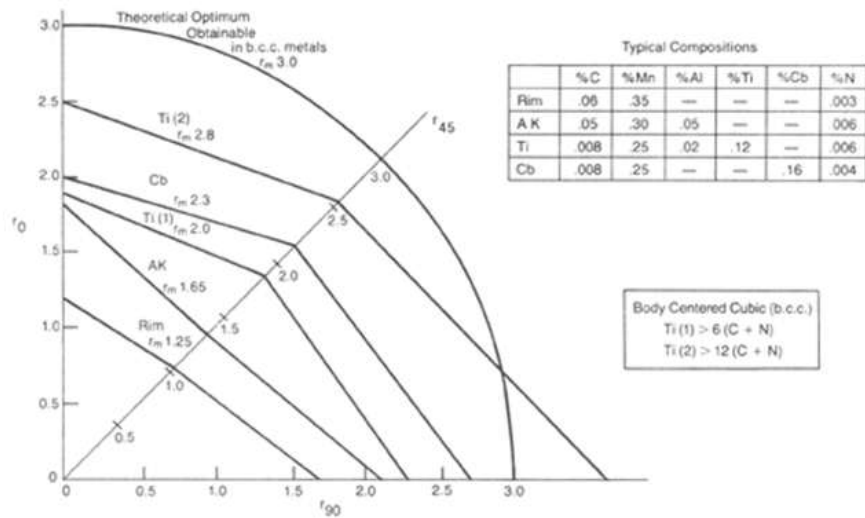


Figura 54. Gráficas comparativas del índice de anisotropía plástica y planar calculado para los aceros SAE 1006 DDQ de espesor 0.45 mm.



Durante el desarrollo de la investigación, se corroboran bases científicas emitidas en documentos, como lo es el hecho de que los micro aleantes en los aceros IF tienen la función de mejorar la anisotropía plástica, permitiendo a los materiales durante la deformación plástica, reacomodar homogéneamente dicha deformación. Si el índice de anisotropía es mayor a 1, el material tendrá mayor capacidad de deformarse sin reducir su espesor y si es menor a 1, el material se adelgazara más de que lo que puede estirarse, llegando a fallar por desgarre. De igual forma si su anisotropía planar es cercana a cero el material estirará homogéneamente y si es diferente de cero habrá tendencia a la formación de orejas.

Figura 55. Gráficas comparativas del índice de anisotropía plástica con respecto a la composición química del acero.



4.2.2. Determinación del índice de endurecimiento por deformación exponente n

Para el cálculo de la capacidad de deformación de los aceros IF sometidos a recocido y posteriormente a temple y de los aceros SAE 1006 DDQ comercializados en la industria nacional, se utilizó como referencia, la norma ASTM E 646 que describe paso a paso el procedimiento para su determinación.

Es importante antes de presentar los resultados de la prueba para buscar el recocido que me permita obtener aceros IF con calidad de embutición, recordar que el índice de endurecimiento por deformación representa la habilidad que tiene el material para distribuir uniformemente la deformación plástica en presencia de un gradiente de tensión, haciendo énfasis en la capacidad de estirado que pueda alcanzar sin sufrir estricción o deformación plástica no uniforme.

La figura 56 muestra el cálculo en Excel del índice n para uno de los rollos IF de prueba después de ser sometido al ensayo de tensión uniaxial. Este valor fue determinado tomando los datos de la curva en la zona plástica del material y la deformación obtenida en cada dato de la carga

Figura 56. Ejemplo del cálculo del índice de endurecimiento por deformación n de los rollos de acero IF después de obtener la información del ensayo de tensión.

Espesor: 0.60 mm		Temperatura de sostenimiento: 690°C									
$\sigma = S(1+e)$ $\epsilon = \ln(1+e)$		$n = \frac{N \sum_{i=1}^N (\log \epsilon_i \log \sigma_i) - \left(\sum_{i=1}^N \log \epsilon_i \sum_{i=1}^N \log \sigma_i \right)}{N \left(\log \epsilon_i \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^N \log \epsilon_i \right)^2}$					$n = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{N \sum x^2 - (\sum x)^2}$				
Carga (Newtons), Esfuerzo en (MPa)							$b = \frac{\sum y - n \sum x}{NM}$				
							$K = \exp[b]$				
Bobina	No datos	e	Carga	S	σ	ϵ	X	X^2	Y	Y^2	XY
97749AAA	1	0.02	1969	261.735	266.970	0.020	-1.703	2.901	2.426	5.888	-4.133
	2	0.04	1980	263.224	273.753	0.039	-1.406	1.978	2.437	5.941	-3.428
	3	0.06	1960	260.566	276.199	0.058	-1.235	1.524	2.441	5.960	-3.014
	4	0.08	2050	272.530	294.333	0.077	-1.114	1.240	2.469	6.095	-2.750
	5	0.10	2143	284.894	313.383	0.095	-1.021	1.042	2.496	6.230	-2.548
	6	0.12	2190	291.142	326.079	0.113	-0.946	0.894	2.513	6.317	-2.377
	7	0.14	2210	293.801	334.933	0.131	-0.883	0.779	2.525	6.375	-2.229
	8	0.16	2239	297.630	345.250	0.148	-0.829	0.686	2.538	6.442	-2.103
	9	0.18	2250	299.119	352.960	0.166	-0.781	0.610	2.548	6.491	-1.990
Σ	9						-9.917	11.656	22.394	55.739	-24.571

Area =	7.52
--------	------

Step 1	Step 2 = Sxy	Step 3	Step 4 = Sxx	Step 5 = "n"	Step 6	Step 7 = b	Step 7a = K
-24.676	0.104	10.927	0.729	0.143	-0.158	2.646	442.721

Indice "n" =	0.143
--------------	-------

Observando los valores obtenidos de n, antes y después del Temple, se determinó que la presencia de inestabilidades en los aceros IF como la elongación en el punto de

fluencia después del recocido, es relevante a la hora someter el material a procesos de deformación. Los aceros IF recocidos experimentan valores de n más bajos que los valores obtenidos para el acero IF de la prueba después del temple, esta condición afecta la capacidad de estirado homogéneo que puede presentar el material antes de sufrir estricción. Para el caso de la prueba de recocido, la diferencia entre antes y después de temple se encuentra en un 20 %. La razón de esta diferencia entre los índices de endurecimiento por deformación se centra en el hecho de que el índice es calculado sobre la deformación plástica de la curva esfuerzo deformación, lo cual no genera homogeneidad en la pendiente del cálculo a diferencia del acero IF templado el cual no presenta inestabilidad y el paso de la zona elástica a la plástica es limpio. Así mismo la afectación de la inestabilidad también se refleja en la relación TS/YP, en donde se observa que para el acero IF del recocido de prueba antes de ser templado, presenta una relación menor similar al índice de endurecimiento por deformación n , casi del 20% con respecto al acero recocido ya templado. Ver tabla 17.

Tabla 17. Tabla comparativa del Índice de endurecimiento por deformación n y la relación TS/YP antes y después de temple para los aceros IF sometidos al recocido de prueba.

Rollos	RECOCIDO (AAA)		TEMPLE (AAAA)	
	TS/YP	n	n	TS/YP
97749	1.20	0.16	0.21	1.60
97750	1.24	0.19	0.20	1.47
97751	1.25	0.15	0.20	1.49
97752	1.18	0.17	0.19	1.48
ASTM A 1008 DQ		0.17 a 0.22		
ASTM A 1008 DDQ		0.20 a 0.25		

Los resultados del recocido que se encuentra tabulados en la tabla 17, en el que se buscó un ΔT de 10°C con temperatura de recristalización de 690°C, fueron homogéneos en sus propiedades mecánicas antes y después del temple y se consiguió clasificar el material como acero libre de intersticios calidad embutición.

Las figuras 57, 58, 59 y 60 dejan la evidencia de la diferencia que hay entre el índice de endurecimiento por deformación de un acero IF recocido y un acero IF templado, diferencia marcada por la presencia de inestabilidad debido al reacomodamiento de dislocaciones y eliminación de todos los esfuerzos residuales provenientes del proceso de reducción, durante el recocido.

Figura 57. Probetas del ensayo de tensión uniaxial correspondientes al rollo de acero IF 97749AAA y 97749AAAA con diferente índice de endurecimiento por deformación.



Figura 58. Gráfica que muestra el valor del índice de endurecimiento por deformación para cada rollo IF después del tratamiento térmico de recocido y del temple.

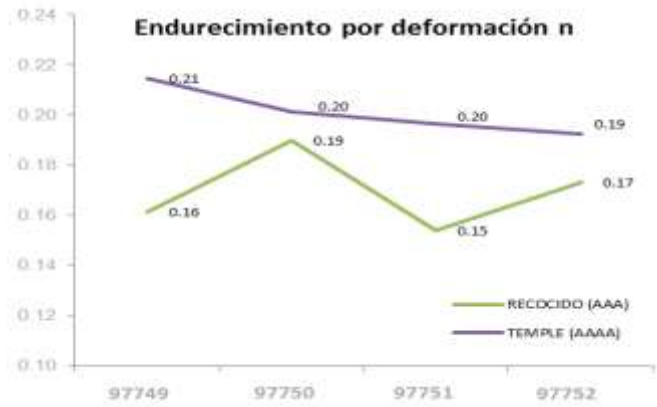


Figura 59. Valores de n y relación TS/YP obtenidos en los aceros IF del recocido de prueba antes y después del temple.

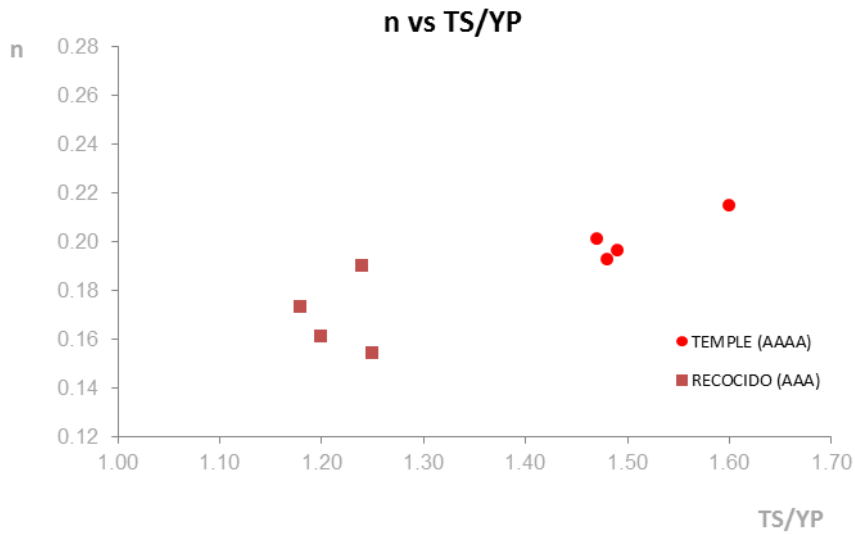
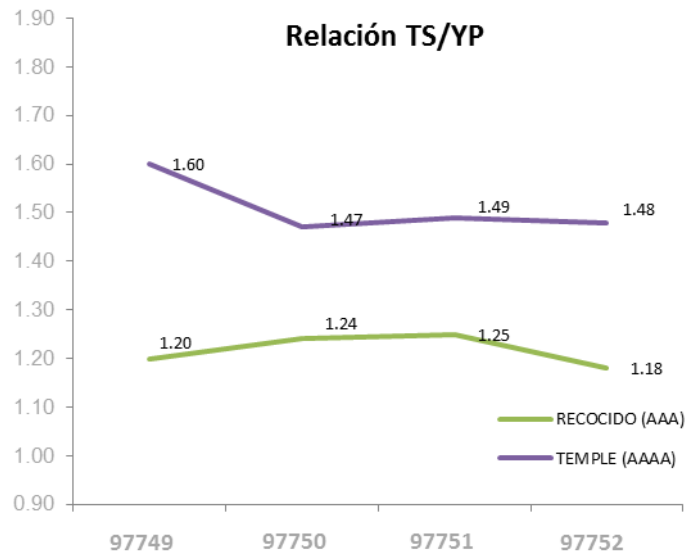


Figura 60. Relación TS/YP obtenidos en los aceros IF del recocido de prueba antes y después del temple.



En la tabla 18 se encuentran consignados los valores obtenidos de endurecimiento por deformación y la relación TS/YP para los aceros SAE 1006 DDQ caracterizados dentro de la investigación, con el fin de compararlos con los aceros IF recocidos en campana para obtener calidad embutición. Los resultados clasifican a estos aceros como DDQ.

Tabla 18. Tabla comparativa del Índice de endurecimiento por deformación n y la relación TS/YP para los aceros SAE 1006 DDQ comercializados en la industria nacional.

SAE 1006 DDQ			
Rollo	Espesor	n	TS/YP
11178	0.60	0.22	1.55
11195	0.60	0.24	1.75
11196	0.60	0.24	1.70
11204	0.60	0.23	1.65
11120	0.45	0.21	1.49
12063	0.45	0.21	1.52
11136	0.45	0.20	1.48
ASTM A 1008 DQ		0.17 a 0.22	
ASTM A 1008 DDQ		0.20 a 0.25	

Una vez obtenidos los resultados de n para los aceros IF recocidos y los aceros SAE 1006 DDQ comercializados, se hace la respectiva comparación del índice y de la relación TS/YP, encontrando mayor capacidad de estiramiento y mayor relación TS/YP en los aceros SAE 1006 DDQ. Como son cálculos correlacionados con el grado de

temple que se hace después que el material ha sido recocido para eliminar la elongación existente en el punto de fluencia, no es posible identificar si este fue o no suficiente para eliminar la inestabilidad existente o si por el contrario se excedió en la cantidad de reducción a realizar y se terminó por variar la fluencia de manera negativa, generando un aumento que termino por afectar la relación TS/YP y por consiguiente el índice n. Ver tabla 19 y gráficas 61, 62 y 63.

Tabla 19. Tabla comparativa del Índice de endurecimiento por deformación n y la relación TS/YP, para los aceros de prueba IF y SAE 1006 de espesor 0.61 mm calidad DDQ.

Rollos	ACERO IF PRUEBA 0.60 mm		SAE 1006 DDQ 0.60 mm		Rollos
	TS/YP	n	n	TS/YP	
97749	1.60	0.21	0.22	1.55	11178
97750	1.47	0.20	0.24	1.75	11195
97751	1.49	0.20	0.24	1.70	11196
97752	1.48	0.19	0.23	1.65	11204
ASTM A 1008 DQ		0.17 a 0.22		ASTM A 1008 DQ	
ASTM A 1008 DDQ		0.20 a 0.25		ASTM A 1008 DDQ	

Figura 61. Índice de endurecimiento por deformación n de los aceros de prueba IF y SAE 1006 DDQ comercializados en espesor 0.61 mm.



Figura 62. Relación TS/YP obtenida de los ensayos de tensión a los aceros de prueba IF y SAE 1006 DDQ comercializados en espesor 0.60 y 0.45 mm.

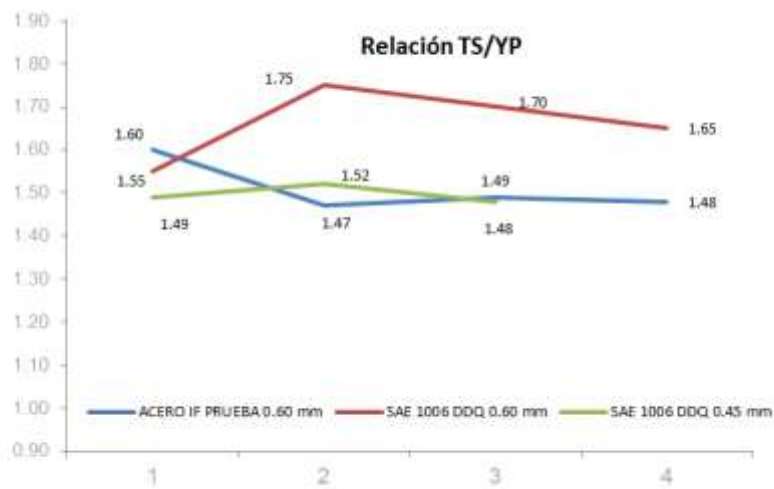
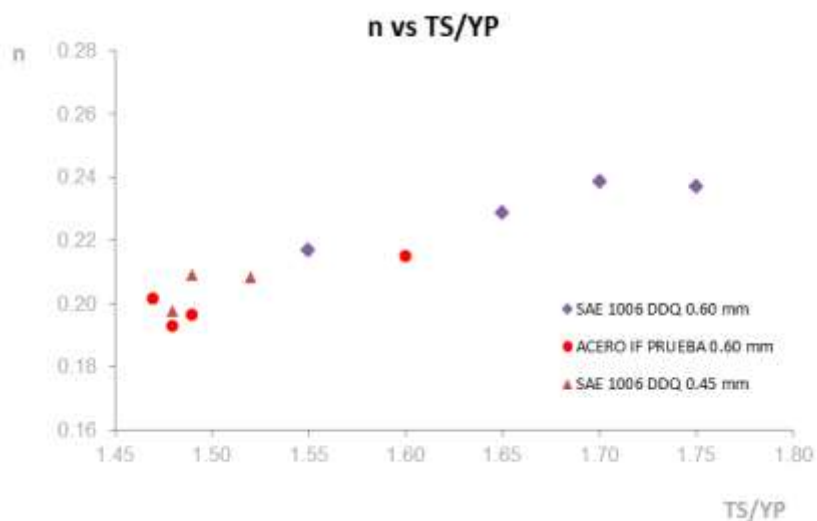
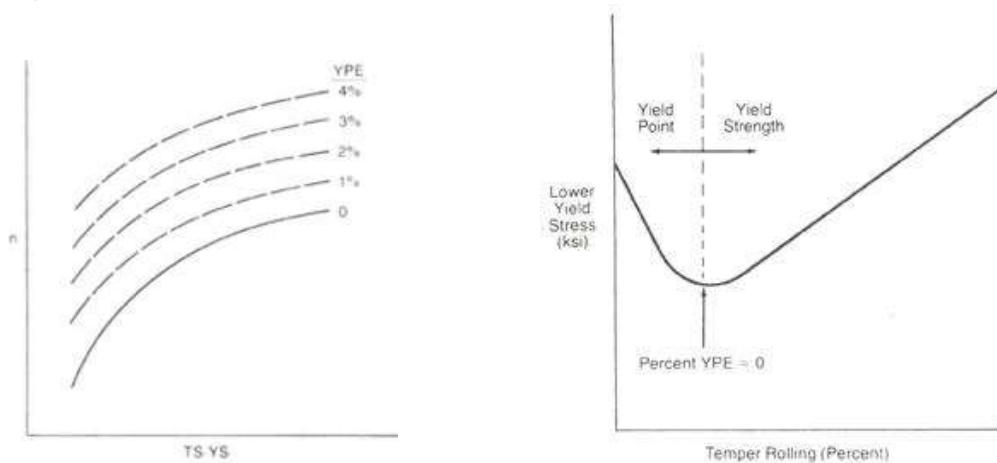


Figura 63. Endurecimiento por deformación n vs Relación TS/YP obtenida de los ensayos de tensión a los aceros de prueba IF y SAE 1006 DDQ comercializados en espesor 0.60 y 0.45 mm.



Con los cálculos del índice n y la relación TS/YP, se corroboran las investigaciones realizadas para buscar correlación de propiedades antes del temple y después del temple con respecto a la inestabilidad que ocasiona el recocido. Ver figura 64.

Figura 64. Relación existente entre el YPE, n y TS/YP con el porcentaje de reducción del temple.



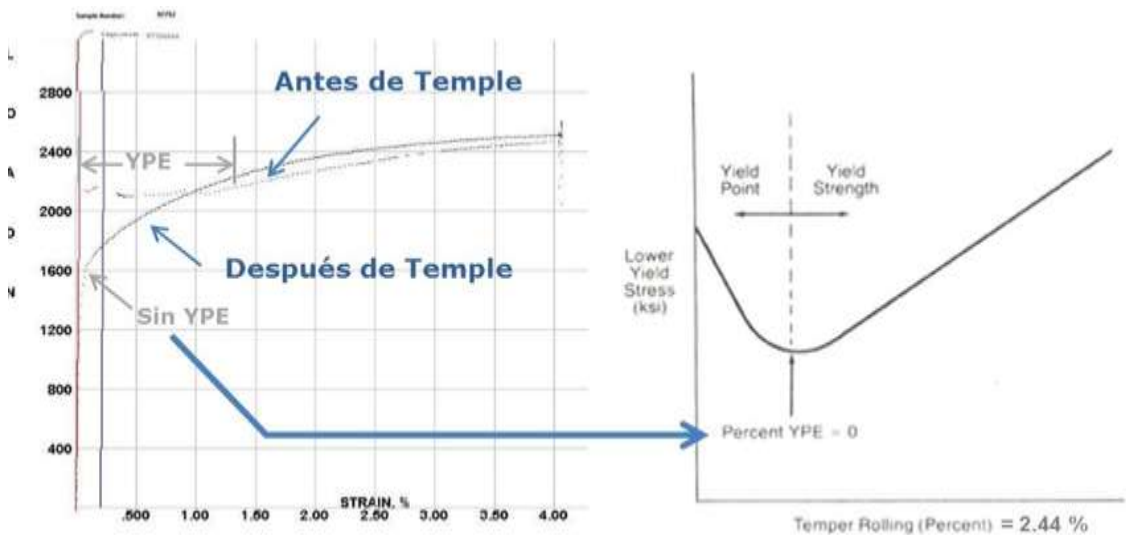
<http://www.a-sp.org/database/viewsec.asp?sec=246>

4.2.3. Determinación de las propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los aceros IF de prueba y los aceros SAE 1006 DDQ, fueron realizados de acuerdo a norma ASTM E8, determinando en este paso de la investigación, el punto de fluencia (YP), la resistencia máxima (TS), la elongación y estableciendo la cantidad de YPE o elongación del punto de fluencia a minimizar o eliminar durante el tratamiento de temple después del recocido.

La figura 65 corresponde a dos registros obtenidos de la curva esfuerzo vs deformación para el acero IF de prueba 97752 antes de temple (recocido) y después de temple, estos resultados son representativos para los 3 rollos restantes de dicha carga. La curva que representa las propiedades mecánicas del material antes de temple, registra después de la zona elástica, una zona inestable de transición basta para buscar nuevamente la línea de deformación plástica, esta zona se conoce como el YPE o elongación del punto de fluencia y su inestabilidad guarda una fuerte relación con el reacomodamiento de la estructura producto del recocido. Este YPE observado es el causante de que el material antes de temple presente fluencia, resistencia y dureza más altas y elongación más baja y después de temple por su eliminación debido al % de reducción aplicado para eliminar la inestabilidad (YPE), presente propiedades mecánicas más bajas y elongación mayor. Ver tabla 20 y figuras 65, 66 y 67.

Figura 65. A Izquierda se encuentran dos registros del ensayo de tensión obtenido para el rollo IF 97752 (antes y después de temple) y a la derecha gráfica que explica la incidencia del temper en la eliminación del YPE.



Los rollos de acero IF estabilizado con titanio que han sido sometidos al recocido de prueba para obtener calidad embutición, son clasificados de acuerdo a la norma ASTM A 1008 como aceros DQ, logrando el objetivo de la prueba, el cual consistía en buscar el gradiente de temperatura y la temperatura de recristalización apropiadas para obtener aceros IF calidad DQ.

Tabla 20. Tabla comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas para los aceros IF de prueba, después del recocido y del temple.

Rollo	RECOCIDO (AAA)				TEMPLE (AAAA)			
	Dureza (HRB)	Elongación (%)	Resistencia max.(MPa)	Fluencia (MPa)	Fluencia (MPa)	Resistencia max.(MPa)	Elongación (%)	Dureza (HRB)
97749	44.3	39.0	311	260	186	297	43.2	31.1
97750	44.2	40.2	320	258	202	296	45.0	32.4
97751	45.1	28.0	326	260	200	297	38.8	36.6
97752	45.5	37.8	338	286	203	300	37.4	36.5
ASTM A1008 DQ		>36	NA	150 a 240		NA	>36	NA
ASTM A1008 DDQ		>38	NA	115 a 200		NA	>38	NA

Figura 66. Gráfica de las propiedades mecánicas de fluencia y resistencia, antes y después del temple.

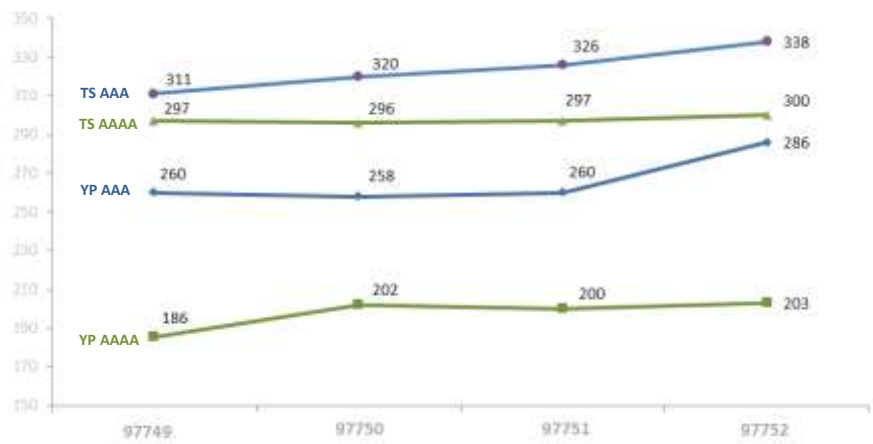


Figura 67. Gráfica de las propiedades mecánicas de dureza y elongación, antes y después del temple.

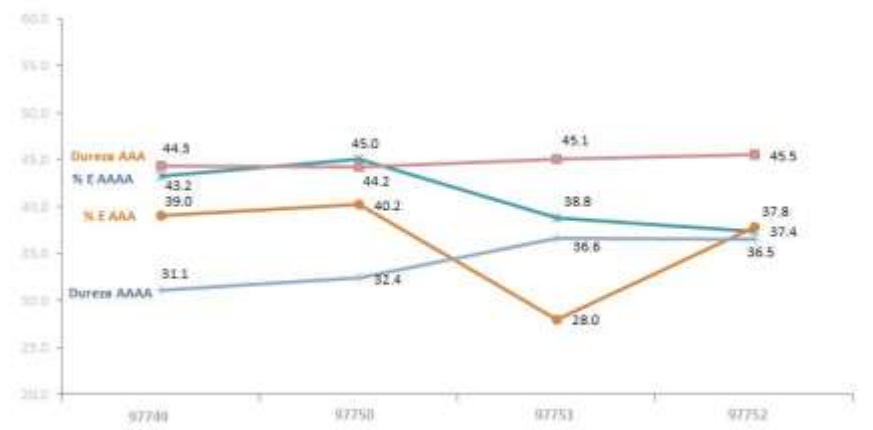


Tabla 21. Tabla comparativa de las propiedades mecánicas obtenidas para los aceros IF de prueba y SAE 1006 DDQ comercializados.

Rollo	IF 0.60 mm				SAE 1006 DDQ 0.60 mm				Rollo
	Dureza (HRB)	Elongación (%)	Resistencia max.(MPa)	Fluencia (MPa)	Fluencia (MPa)	Resistencia max.(MPa)	Elongación (%)	Dureza (HRB)	
97749	31.1	43.2	297	186	189	293	44.0	32.5	11178
97750	32.4	45.0	296	202	172	301	41.4	31.7	11195
97751	36.6	38.8	297	200	181	307	45.4	33.4	11196
97752	36.5	37.4	300	203	190	313	40.8	31.4	11204
ASTM A1008 DQ		>36	NA	150 a 240	NA	>36			
ASTM A1008 DDQ		>38	NA	115 a 200	NA	>38			

Con respecto a las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de tensión para los aceros SAE 1006 DDQ, se pudo corroborar la calidad con la que son

comercializados, calidad DDQ y en comparación con los aceros IF de prueba, la ductilidad que ambos registran es muy similar. Ver tabla 21.

4.2.4. Análisis Metalográfico

El análisis metalográfico convencional para caracterizar el tipo de microestructura que presenta el acero libre de intersticios y los aceros SAE 1006 DDQ, se hace en el laboratorio de metalografía y preparación de muestras de ACESCO y la UNIVERSIDAD DEL NORTE.

Se utiliza para los ensayos en ACESCO un microscopio de platina invertida Olympus PMG3 y en la UNIVERSIDAD DEL NORTE el microscopio de platina invertida PMG con un analizador de imágenes en prueba Clemex Vision PE 5.0.

Figura 68. Microscopio metalográfico de platina invertida PMG3 y pantalla del analizador de imágenes Clemex Vision PE 5.0.



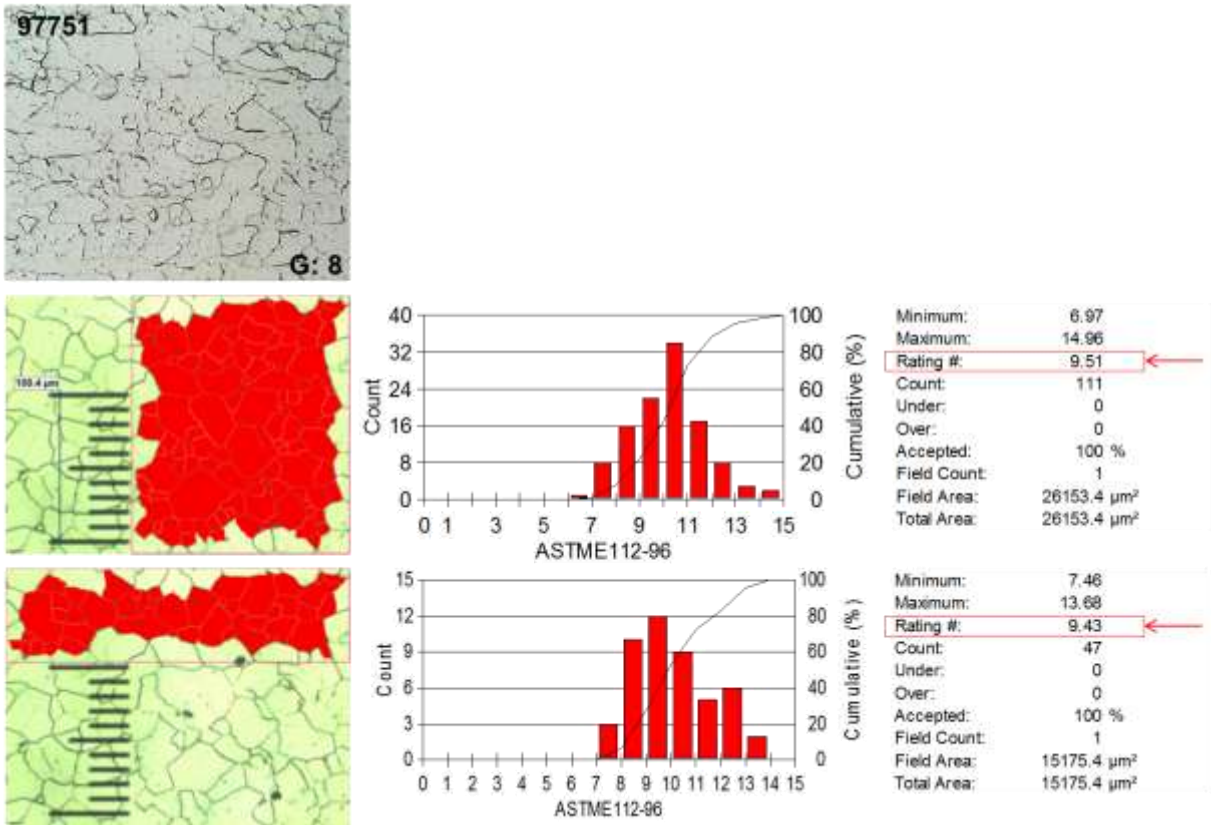
En cuanto a la estructura de los aceros libres de intersticios y estabilizados con titanio, se observó durante su caracterización al microscopio metalográfico, micro estructura equiaxial de matriz ferrítica, con precipitados de forma regular color naranja que corresponden a Nitruros de Titanio TiN [4],[10], producto del titanio en exceso que contiene estos aceros en su composición química. También se pudo determinar que el tamaño de grano ASTM E 112 se encuentra entre N° 5, 6 y 7 para los aceros en estado de suministro de la prueba, es decir como lamina en caliente de 3 mm. Ver figura 70.

La caracterización metalográfica correspondiente al acero después de ser sometido a un proceso de reducción del 79 % para pasar de 3 mm a 0.615 mm, se observó de

manera generalizada, microestructura de matriz ferrítica con grano amorfo y Nitruros de Titanio TiN como precipitados de forma regular y coloración naranja, estos precipitados no se encuentran deformados. Ver figura 70.

Para el caso del recocido de prueba a 690°C de temperatura de recrystalización y con un ΔT de 10°C, se observó al microscopio, matriz ferrítica con morfología heterogénea de grano fino y equiaxial, cuyo tamaño de grano ASTM E 112 estuvo distribuido entre 8 y 9, valores similares en todas las posiciones de la carga del recocido, de igual forma que en la lámina en caliente, también fueron observados pequeños compuestos intermetálicos de Nitruros de Titanio TiN de forma regular y de coloración naranja. Ver figura 69.

Figura 69. Análisis del tamaño de grano ASTM E 112 con el analizador de imágenes Clemex Vision PE. 5 para el acero IF 97751 AAAA.



La observación fue realizada sin ataque para determinar nivel de inclusiones no metálicas y metálicas y se atacó posteriormente con Nital 2% para la observación de la microestructura y determinación de tamaño de grano ASTM E 112.

A diferencia de los aceros SAE 1006 DDQ comercializados en la industria nacional, cuya estructura típica estuvo conformada por matriz ferrítica de grano pancake con tamaño de grano ASTM E 112 N° 8, siguiendo la orientación de la deformación de los

granos en el proceso de reducción y con algunas inclusiones no metálicas de óxidos, los aceros IF presentaron en estado recocido, estructura granular equiaxial y para ambos tipos de acero el tamaño de grano estuvo entre ASTM E 112 8 y 9. Ver figura 69, 71 y 72.

Figura 70. Metalografías correspondientes al rollo IF 97750 representativa de los aceros IF de la prueba en cada uno de los estados por los que estuvieron (lamina en caliente, lamina en frío, lámina recocida y lamina con temple).

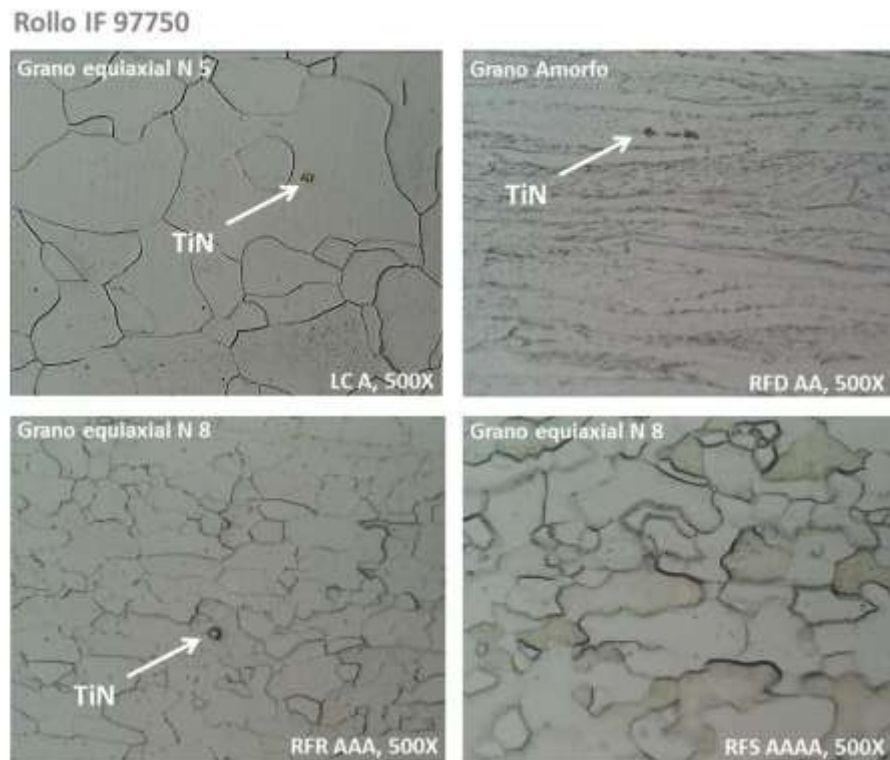


Figura 71. Metalografías correspondientes al rollo IF 97752 y al rollo SAE 1006 DDQ 11196, cuya matriz es ferrítica pero con diferente morfología, equiaxial para el IF y pancake para el SAE.

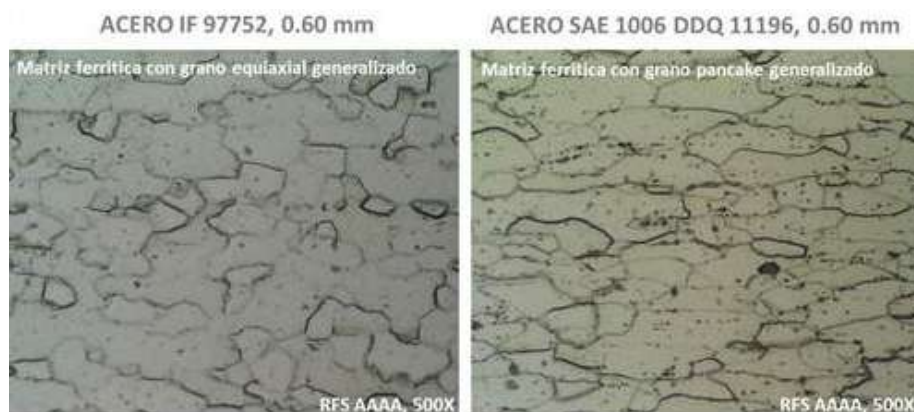








Figura 72. Metalografías correspondientes a los rollos IF Y SAE 1006 DDQ, con presencia de matriz ferrítica, pero con grano equiaxial para los IF y grano pancake para los SAE, el tamaño de grano a 100X es ASTM N 8 que corresponde a un grano fino.

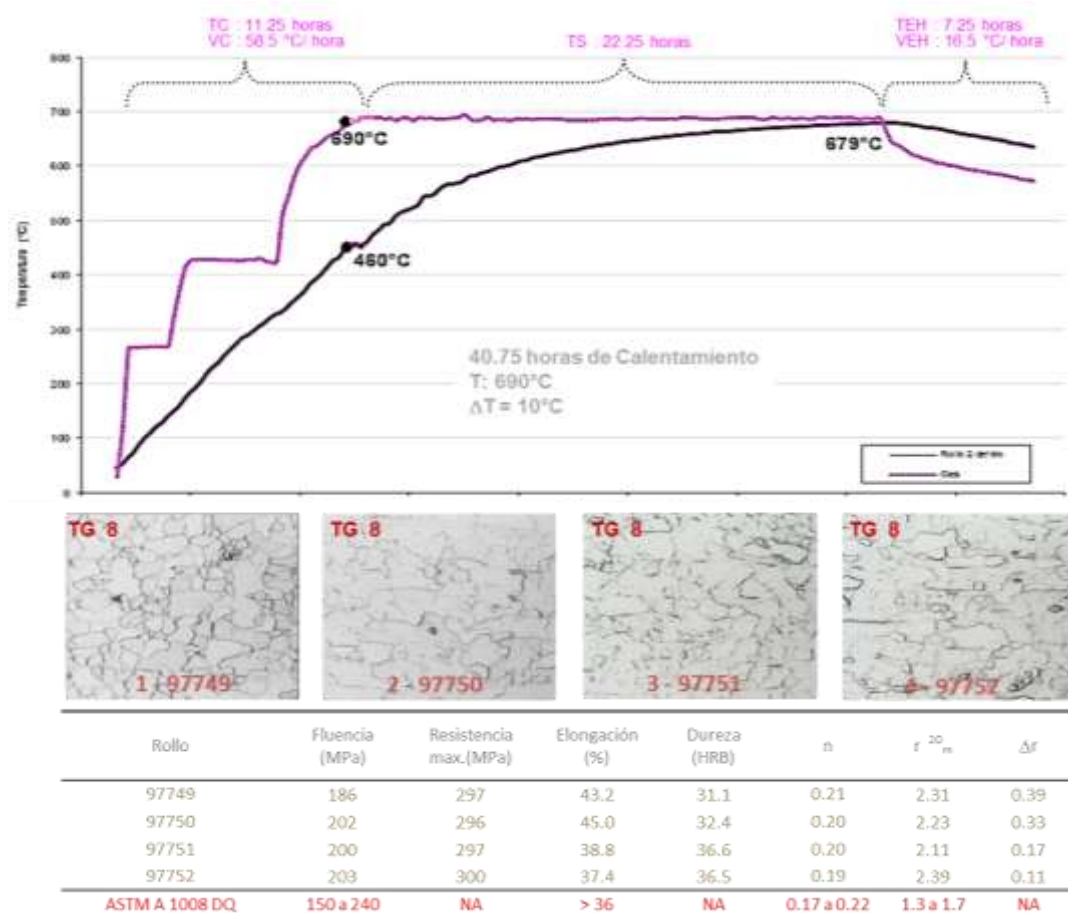
Aceros IF DQ	Aceros SAE 1006 DDQ
<div>4 - 97752</div> 	<div>11204</div> 
<div>3 - 97751</div> 	<div>11196</div> 
<div>2 - 97750</div> 	<div>11195</div> 
<div>1 - 97749</div> 	<div>11178</div> 
EQUIAXIAL	PANCAKE

4.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA RECOCIDOS EN CAMPANA 100 % HIDROGENO DE ACEROS LIBRES DE INTERSTICIOS

Ya teniendo la información que nos permite conocer cuál es la temperatura, el gradiente de temperatura y tiempos de calentamiento necesarios para alcanzar en aceros libres de intersticios la calidad de embutición, viene ahora dentro de la investigación, detallar con mayor precisión los intervalos permisibles en que se puede mover la temperatura de recrystalización y el tiempo de calentamiento para asegurar repetibilidad en dicha calidad y encontrar el grado de sensibilidad de las propiedades con respecto al proceso de transformación.

La figura 73, muestra un resumen de lo encontrado en esta primera parte de la investigación, en donde se conoció el comportamiento metalúrgico de los aceros libres de intersticios estabilizados con titanio, así como las variables del proceso del recocido y temple que se tienen que dar para obtener la calidad buscada.

Figura 73. Resumen del recocido de prueba a 690°C con ΔT de 10°C para los aceros IF, las propiedades mecánicas y el tipo de estructura resultante.



De igual forma quedo establecido que la metalurgia de los aceros IF es de avanzada con respecto a los aceros SAE 1006 DDQ, si tenemos en cuenta que la anisotropía que debe tener el material es la propiedad fundamental a considerar en los procesos de embutición.

Se construyó un diseño de experimentos con un solo factor denominado temperatura de recristalización, teniendo en cuenta que la inercia térmica del acero observada en la prueba fue muy lenta después de que se consiguió gradientes de temperatura cercanos a los 35 °C. Para el caso de la prueba, la velocidad de calentamiento observada y registrada desde el gradiente de temperatura ΔT de 35 °C hasta alcanzar el gradiente de temperatura ΔT de 10 °C fue de 2.2°C/hora. Esto indica que el recocido desde el punto en que inició la última etapa del calentamiento (ΔT : 35°C) hasta que consiguió el gradiente final (ΔT : 10°C) transcurrieron aproximadamente 12 horas más de calentamiento, adicionales a las necesarias para buscar calidad comercial de acuerdo a registros históricos. Este análisis es exclusivo de la carga de prueba (88260 Kg) de esta investigación.

De esta forma se genera el criterio para evaluar el recocido y buscar optimizar las curvas garantizando el resultado, el cual tiene que ver con las propiedades mecánicas necesarias para obtener calidad embutición.

En la tabla 22 se muestra el diseño de experimentos planteado en la investigación.

Tabla 22. Información básica del diseño de experimentos.

Factor de Diseño

Corridas	Temperatura Sosténimiento °C	Delta Temperatura	Tiempo de Sosténimiento	Anisotropía Plástica	Endurecimiento Deformación	Fluencia Mpa	Resistencia Mpa	Elongación %
1	700	cte	cte	r	n	Yp	TS	%
2	690	cte	cte	r	n	Yp	TS	%
3	680	cte	cte	r	n	Yp	TS	%
4	670	cte	cte	r	n	Yp	TS	%

Variables de Respuesta

Este diseño fue realizado inicialmente para cargas entre 82 y 86 Toneladas, avanzada la investigación se presentó la posibilidad en planta de ejecutar el diseño para material con cargas entre 56 y 60 Toneladas, inferiores a las que inicialmente se hizo y con espesores acordes a la necesidad de clientes. Con estos pesos de carga se cubre en buena parte la gama del proceso industrial de recocido en campana de ACESCO, de

tal forma que los niveles del diseño se corrieron en las dos opciones. Con la información de las curvas y las propiedades mecánicas se determina si es factible generar ecuaciones que conduzcan a reproducir los tiempos esperados de recocido de acuerdo a la carga y a la temperatura de recristalización programada.

4.3.1. Primera corrida de aceros IF

La primera corrida de aceros IF se hizo para los niveles establecidos (680°C, 690°C y 700°C) y con pesos de carga para cada recocido entre 83.000 kg y 86.000 kg,

La composición química de los rollos libres de intersticios se ajustó a la de aceros libres de intersticios estabilizados con Titanio, igual que para la primera prueba realizada. La composición química de los 16 rollos escogidos, se documenta en la tabla 23.

Tabla 23. Composición química de los aceros IF estabilizados con Ti usados en la primera corrida del diseño de experimentos.

Bobina	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	N	Ti
99605	0.0011	0.004	0.12	0.013	0.0750	0.029	0.0006	0.0024	0.0290
99166	0.0011	0.005	0.12	0.010	0.0490	0.038	0.0070	0.0020	0.0420
97738	0.0013	0.005	0.14	0.010	0.0067	0.030	0.0005	0.0022	0.0390
98643	0.0011	0.006	0.13	0.010	0.0047	0.038	0.0009	0.0020	0.0420
98642	0.0010	0.006	0.11	0.010	0.0060	0.032	0.0005	0.0020	0.0550
99602	0.0015	0.006	0.10	0.009	0.0090	0.024	0.0006	0.0000	0.0380
99606	0.0012	0.007	0.11	0.010	0.0055	0.031	0.0005	0.0020	0.0400
A1622	0.0010	0.008	0.12	0.009	0.0081	0.031	0.0018	0.0020	0.0740
99603	0.0015	0.006	0.13	0.012	0.0073	0.026	0.0007	0.0026	0.0035
98632	0.0010	0.005	0.12	0.009	0.0047	0.038	0.0009	0.0020	0.0420
A1623	0.0010	0.009	0.13	0.011	0.0074	0.029	0.0022	0.0014	0.0730
99153	0.0012	0.010	0.12	0.012	0.0076	0.034	0.0015	0.0018	0.0730

A continuación se relaciona los pesos e identificación de los rollos de acero IF cargados en cada base, así como los espesores que fueron recocidos, los cuales obedecieron a las necesidades del mercado. El sistema de registro de datos se hizo de la misma forma que en el recocido de prueba en donde se llevó el registro del rollo de la posición número 2 y el gas de la atmosfera interna. Ver tabla 24.

Después de realizar los 3 tratamientos térmicos del diseño para cargas superiores a 80.000 kg, se tomaron muestras para las caracterizaciones de los rollos antes y después del temple, con el fin de correlacionar los resultados del recocido de prueba

con los recocidos del diseño de experimentos y de esta forma determinar la influencia de la temperatura de recristalización y el grado de temple en las propiedades mecánicas que clasifican a los aceros IF como aceros de calidad de embutición.

A continuación se describen los resultados de la curva elaborada a través de los registros de temperatura cada 15 minutos para cada una de las cargas, con sus respectivos resultados en cuanto a las propiedades mecánicas antes y después del temple.

Tabla 24. Acero IF cargado en cada recocido de acuerdo al diseño de experimentos.

POSICION DEL ROLLO	Temperatura : 680°C		Temperatura : 690°C		Temperatura : 700°C	
	Rollo	Espesor (mm)	Rollo	Espesor (mm)	Rollo	Espesor (mm)
1	99605	0,70	98642	0,60	99603	0,70
2	98643	0,60	99602	0,60	A1623	0,60
3	99166	0,75	99606	0,60	99153	0,75
4	97738	0,91	A1622	0,60	98632	0,90
Peso Carga (kg)	83525		84045		83425	

La curva obtenida del registro de las temperaturas del gas de la atmosfera y del rollo de posición 2 se encuentra explicada con unas siglas para cada recocido, las cuales señalan los puntos más relevantes que tiene el recocido. Con la información que se recoge de estos puntos podremos construir las ecuaciones para buscar los tiempos aproximados dependiendo de la carga y la temperatura que me den calidad de embutición en aceros IF.

A continuación se describe que significa cada sigla en la curva.

- ISDG** Inicio **s**ostenimiento **d**el **g**as, viene dado para el gas y para el rollo en °C y para el recocido en horas. Es el tiempo en horas que tarda el gas en llegar a la temperatura de recristalización y la Temperatura a la que se encuentra el rollo cuando el gas llega a temperatura de recristalización.
- ISDR** Inicio **s**ostenimiento **d**el **r**ollo, este es el tiempo que tarda el rollo en alcanzar la temperatura de recristalización menos el gradiente programado.
- FDSR** **F**in **d**e **s**ostenimiento de rollo, es el tiempo acumulativo que permanece el rollo en la temperatura de sostenimiento.
- FECH** **F**in de **e**nfriamiento **c**on **h**orno, es el tiempo que tarda el material en llegar a temperaturas por debajo de los 580°C, para evitar micro soldaduras.

4.3.1.1. Recocido a temperatura de 680°C para la carga de 83.525 kg.

Curva elaborada con el registro de la temperatura del gas y del rollo en la posición 2. Ver figura 74 y tabla 25.

Figura 74. Curva tratamiento térmico de acero IF a 680°C con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ para una carga de 83.525 kg.

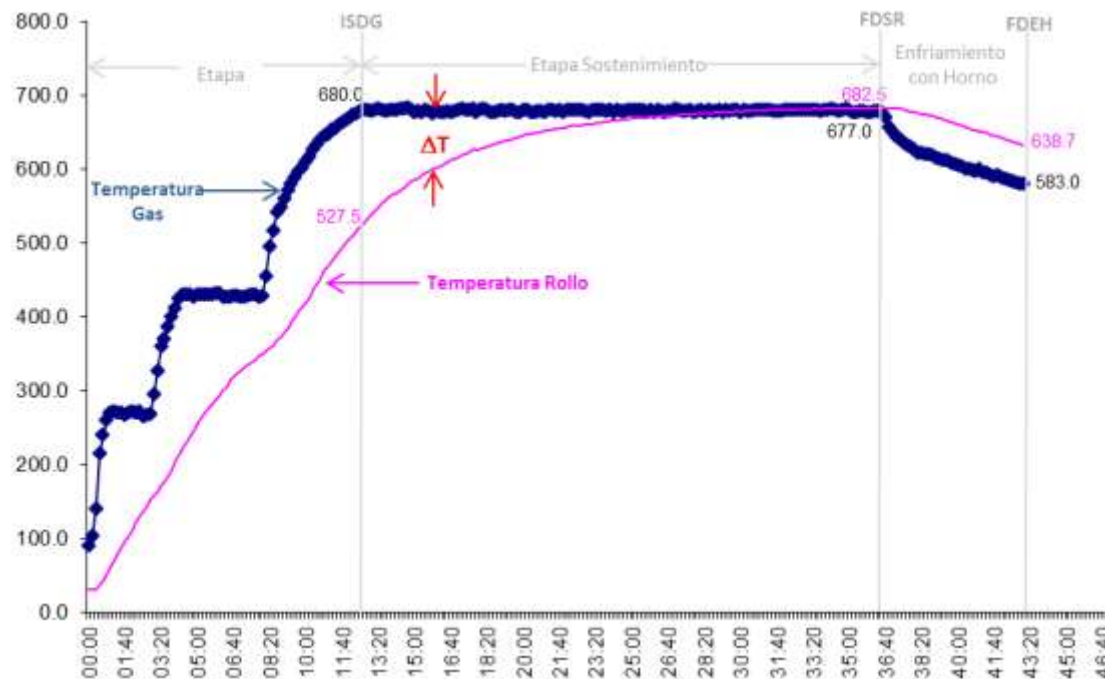


Tabla 25. Tabla resumen de los tiempos y temperaturas más relevantes del recocido a 680°C para carga de 83.525 kg de Acero IF.

RECOCIDO MATERIAL IF T = 680°C, Carga = 83.525 Ton.				
680°C	ISDG	ISDR	FDSR	FECH
Tiempo (hrs)	12.5	32.7	36.5	43.3
Rollo (°C)	521	681	683	630
Gas	680	686	686	480
ΔT (°C)	5			-150
Sostenimiento (hrs)	4			

4.3.1.2. Propiedades mecánicas obtenidas del recocido a temperatura de 680°C para la carga de 83.525 kg.

De la misma forma como se caracterizó el material recocido para aceros IF en la primera parte de la investigación, después del recocido se tomaron muestras con el

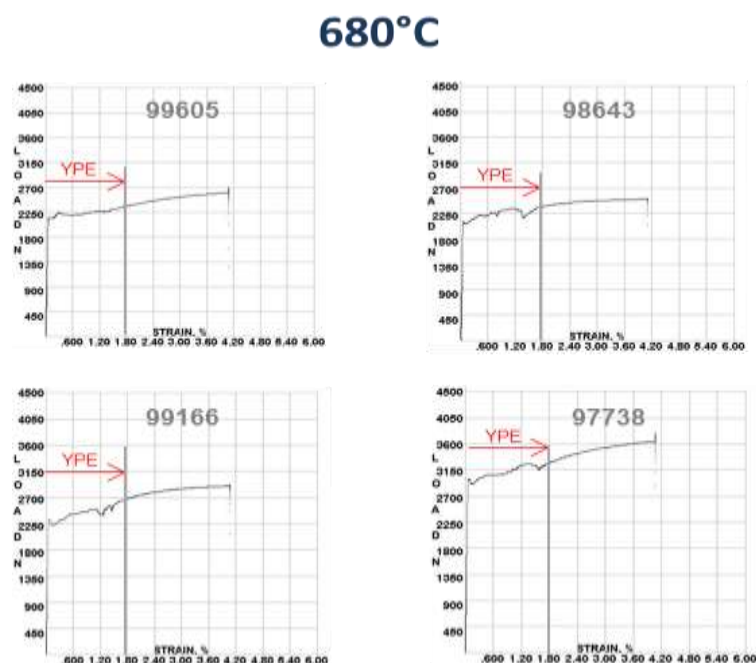
propósito de determinar sus propiedades mecánicas y clasificar la calidad de los aceros IF.

Tabla 26. Tabla resumen de las propiedades mecánicas obtenidas antes del temple para el recocido a 680°C con peso de carga de 83.525 kg de Acero IF.

Rollo	Espesor (mm)	Temperatura (°C)	Fluencia (Mpa)	Resistencia Max. (Mpa)	Elongación (%)	Dureza (HRB)	r	n	Δr
99605	0.71	680	250	303	42	45.0	1.6	0.15	0.11
99166	0.76	680	243	309	39	41.6	1.7	0.15	-0.09
97738	0.91	680	260	331	37	48.2	1.4	0.17	-0.08
98643	0.61	680	267	310	36	50.3	1.8	0.12	-0.01
DS			150 a 240		> 36		1.3 a 1.7	0.17 a 0.22	
DDS			115 a 200		> 38		1.4 a 1.8	0.20 a 0.25	
EDDS			105 a 170		> 40		1.7 a 2.1	0.23 a 0.27	

Las propiedades mecánicas del acero libre de intersticios antes del temple correspondientes a la elongación, anisotropía plástica r y endurecimiento por deformación, clasificaron en las diferentes calidades de embutición que establece la norma ASTM A 1008. La fluencia fue la única propiedad que no clasificó como acero de calidad de embutición, debido a la inestabilidad o elongación del punto de fluencia existente, propia de los aceros que han sido tratados térmicamente y no se han templado. La figura 75, muestra las curvas esfuerzo vs deformación de estos aceros.

Figura 75. Registro de las curvas esfuerzo vs deformación del recocido a 680°C sin temple.



4.3.1.3. Recocido a temperatura de 690°C para la carga de 84.045 kg.

Curva elaborada con el registro de la temperatura del gas y del rollo en la posición 2.
Ver figura 76 y tabla 27.

Figura 76. Curva tratamiento térmico de acero IF a 690°C con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ para una carga de 84.045 kg.

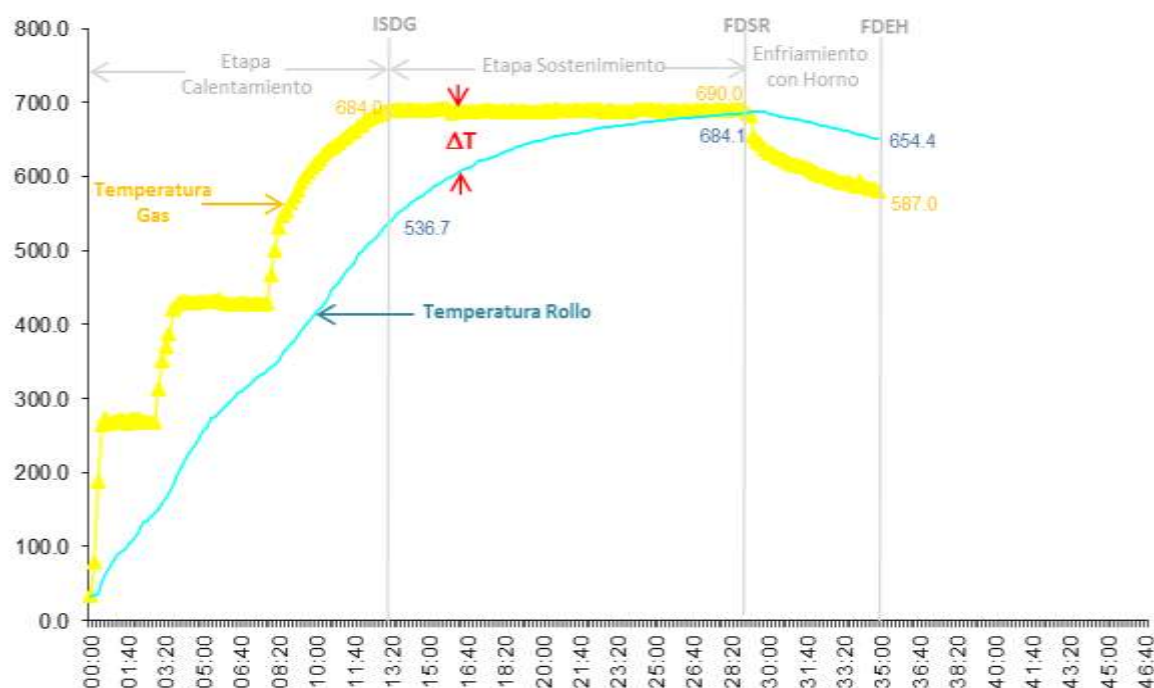


Tabla 27. Tabla resumen de los tiempos y temperaturas más relevantes del recocido a 690°C para carga de 84.045 kg de Acero IF.

RECOCIDO MATERIAL IF T = 690°C, Carga = 84.045 Ton.			
690°C	ISDG	FDSR	FECH
Tiempo (hrs)	13.0	29.2	34.8
Rollo	533	687	586
Gas	689	675	651
ΔT (°C)	12		
Sostenimiento (hrs)	3		

4.3.1.4. Propiedades mecánicas obtenidas del recocido a temperatura de 690°C para la carga de 84.045 kg.

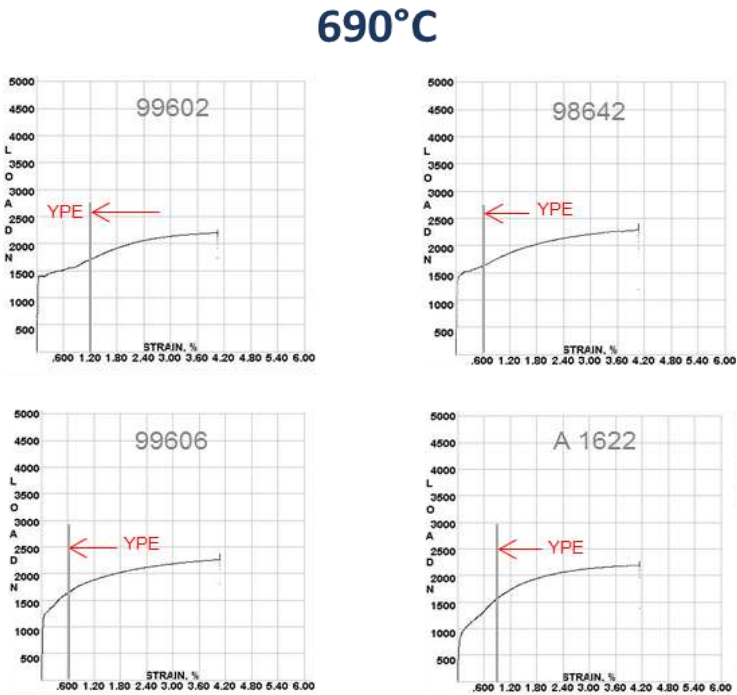
Se determinaron las propiedades mecánicas de los aceros IF estabilizados con Titanio para este recocido. Ver tabla 28.

Tabla 28. Tabla resumen de las propiedades mecánicas obtenidas antes del temple para el recocido a 690°C con peso de carga de 84.045 kg de Acero IF.

Rollo	Espesor (mm)	Temperatura °C	Fluencia (Mpa)	Resistencia Max. (Mpa)	Elongación %	Dureza (HRB)	r	n	Δr
98642	0.61	690	201	319	43	36.7	1.7	0.23	0.19
99606	0.61	690	177	313	40	33.0	1.7	0.25	0.42
99602	0.61	690	193.	308	42				
A1622	0.61	690	135	292	44				
DS			150 a 240		> 36		1.3 a 1.7	0.17 a 0.22	
DDS			115 a 200		> 38		1.4 a 1.8	0.20 a 0.25	
EDDS			105 a 170		> 40		1.7 a 2.1	0.23 a 0.27	

En este recocido a 690°C, el comportamiento de las propiedades mecánicas obtenidas sobre el material sin hacer temple, fue similar a los resultados obtenidos en el recocido de prueba de la primera parte de la investigación para la elongación, la anisotropía plástica r y el endurecimiento por deformación n. La fluencia fue el único valor que generó diferencia entre este recocido y el de prueba, resultado a favor de este recocido, en donde la propiedad de fluencia fue ostensiblemente más baja. Todas las propiedades mecánicas clasificaron en las 3 calidades de embutición designadas por la norma ASTM A 1008, a pesar de que la curva esfuerzo vs deformación de este ciclo registra elongación del punto de fluencia, pero con la aclaración de que es más suave y menos inestable que lo observado hasta ahora. Ver figura 77.

Figura 77. Registro de las curvas esfuerzo vs deformación del recocido a 690°C sin temple.



La diferencia observable de este recocido a 690°C con el de prueba realizado a la misma temperatura, está en el gradiente de temperatura alcanzado al final de la etapa de calentamiento, antes de iniciar el enfriamiento con horno, en donde el tratamiento térmico de prueba alcanzó los 10°C y el recocido de la corrida del diseño alcanzó los 3°C, lo que indica que el acero IF en este último recocido subió 7°C más con respecto al recocido de prueba.

4.3.1.5. Recocido a temperatura de 700°C para la carga de 83.425 kg.

Curva elaborada con el registro de la temperatura del gas y del rollo en la posición número 2. Ver figura 78 y tabla 29.

Figura 78. Curva tratamiento térmico de acero IF a 700°C con ΔT < 10°C para una carga de 83.425 kg.

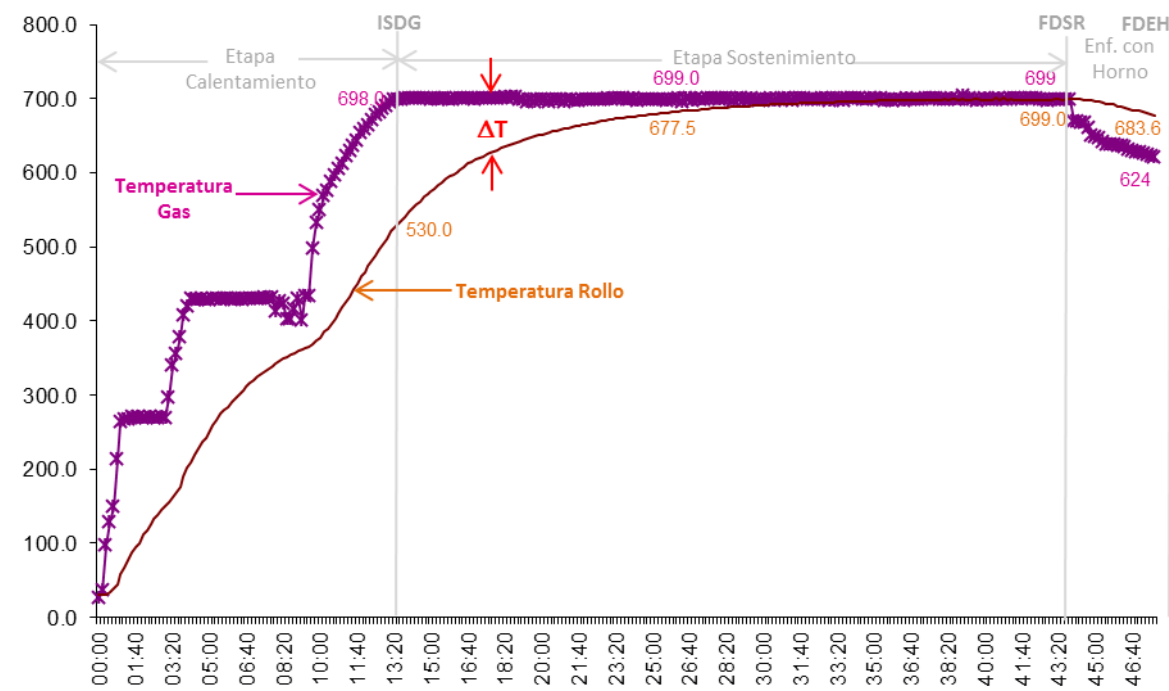


Tabla 29. Tabla resumen de los tiempos y temperaturas más relevantes del recocido a 700°C para carga de 83.425 kg de Acero IF.

RECOCIDO MATERIAL IF T= 700°C, Carga = 83.425 Ton.				
700°C	ISDG	ISDR	FDSR	FECH
Tiempo (hrs)	13.3	39.5	42.8	47.7
Rollo	526	698	699	678
Gas	701	700	700	624
ΔT (°C)	2			-53
Sostenimiento (hrs)	3			

4.3.1.6. Propiedades mecánicas obtenidas del recocido a temperatura de 700°C para la carga de 83.425 kg.

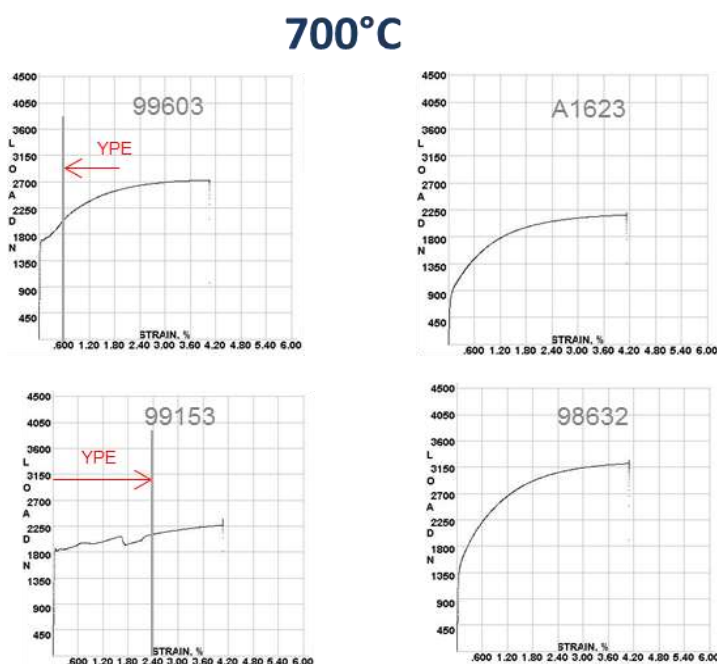
Se determinaron las propiedades mecánicas de los aceros IF estabilizados con Titanio para este recocido sin haberse realizado el temple. Ver tabla 30.

Tabla 30. Tabla resumen de las propiedades mecánicas obtenidas antes del temple para el recocido a 700°C con peso de carga de 83.425 kg de Acero IF.

Rollo	Espesor (mm)	Temperatura °C	Fluencia (Mpa)	Resistencia Max. (Mpa)	Elongación %	Dureza (HRB)	r	n	Δr
99603	0.73	700	194	304	44	36.6	1.7	0.24	0.32
98632	0.94	700	149	278	54	31.2	1.8	0.29	0.54
A1623	0.65	700	138	271	50	32.5	1.9	0.25	0.18
99153	0.60	700	246	317	42	43.6	1.5	0.17	-0.02
DS			150 a 240		> 36		1.3 a 1.7	0.17 a 0.22	
DDS			115 a 200		> 38		1.4 a 1.8	0.20 a 0.25	
EDDS			105 a 170		> 40		1.7 a 2.1	0.23 a 0.27	

Como aspectos relevantes a mencionar de los resultados de este recocido, es el hecho de que las propiedades mecánicas prácticamente en su totalidad clasificaron dentro de todas las calidades de embutición especificadas por la norma ASTM A 1008. Solo la fluencia del rollo 99153 no clasificó, debido a la amplitud de la inestabilidad que este acero presenta y a su morfología irregular.

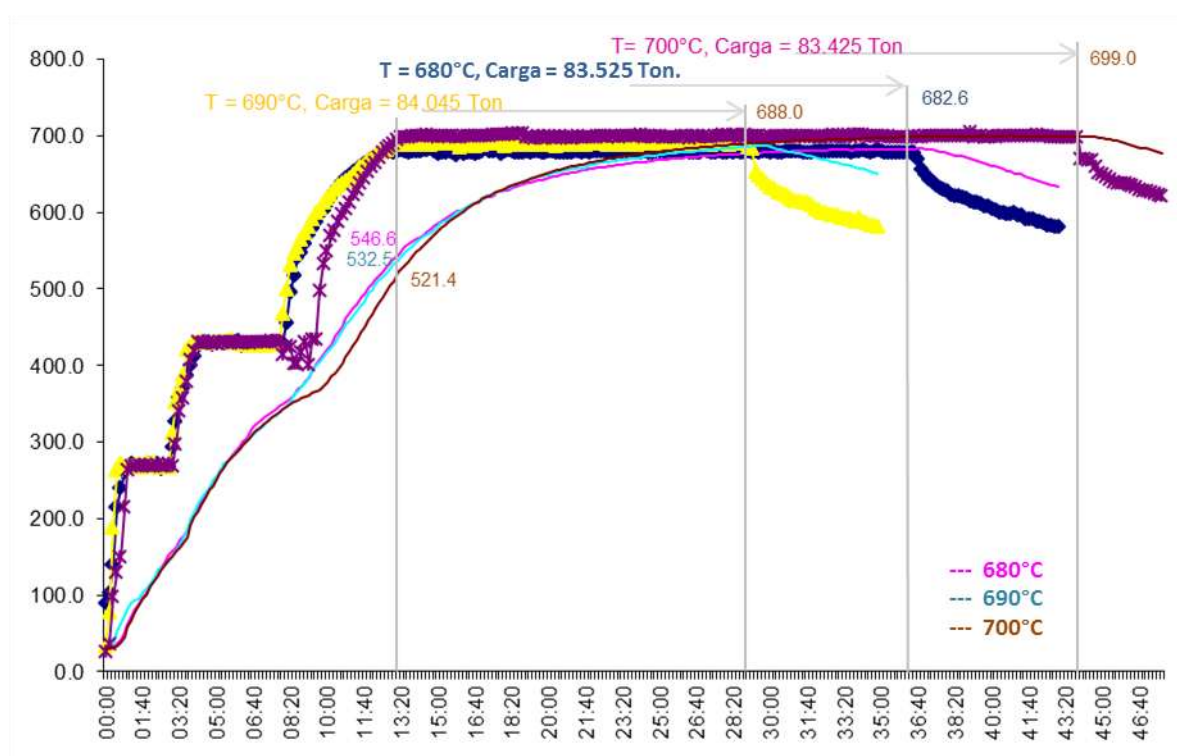
Figura 79. Registro de las curvas esfuerzo vs deformación del recocido a 700°C sin temple.



Los demás aceros de esta carga, evidenciaron una elongación del punto de fluencia bastante regular y suave en su morfología y casi nula en su amplitud. Ver figura 79.

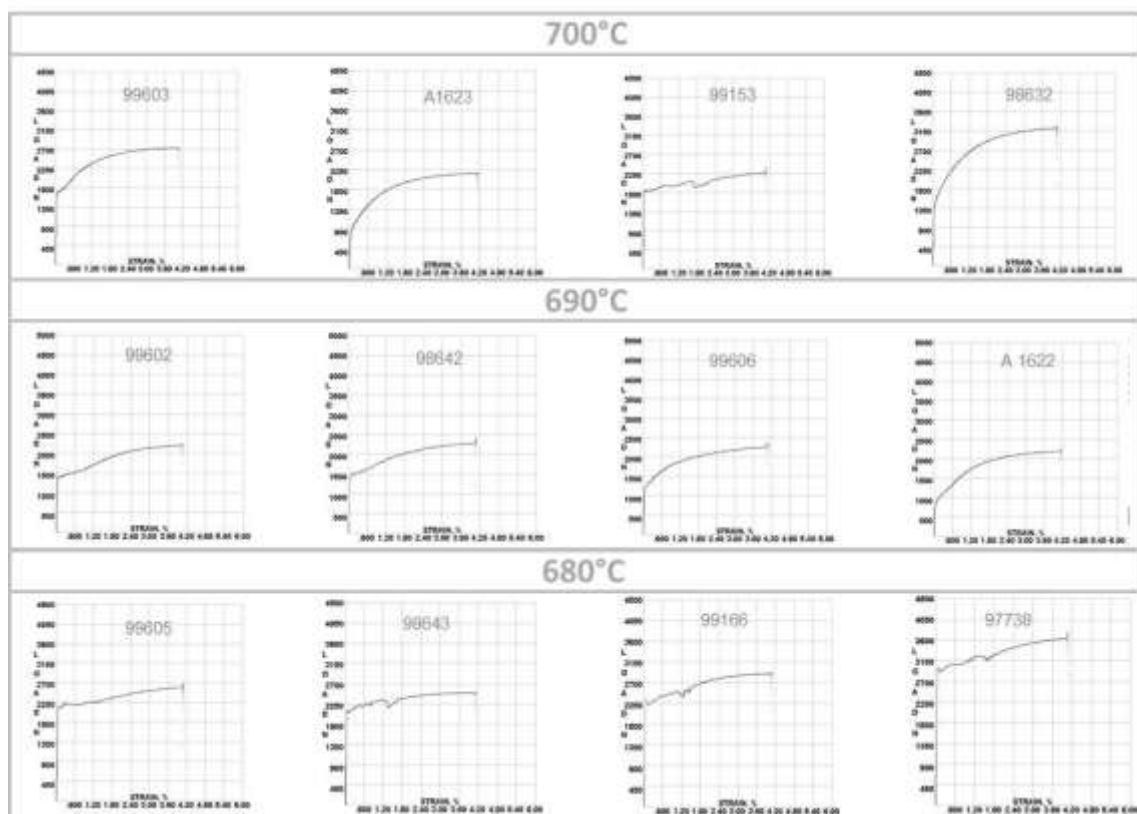
Al final de los tratamientos térmicos para cargas entre 83.000 kg y 86.000 kg, se pudo construir el perfil de temperatura del acero vs el gas de la atmosfera, para 3 niveles de temperatura. Este perfil generó información relevante para la operación a nivel industrial. La gráfica 80, muestra los perfiles traslapados de cada ciclo térmico realizado en la primera corrida del diseño.

Figura 80. Perfil térmico de los 3 niveles de temperatura utilizados para realizar el recocido de aceros IF para cargas mayores a 80.000 kg con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ para obtener calidad embutición.



Teniendo en cuenta los resultados que se obtuvieron en las propiedades mecánicas, es de importancia recalcar que la temperatura de recocido en estos aceros IF, jugó un papel importante en el valor del límite de fluencia, el cual se vio afectado en el valor debido a la elongación del punto de fluencia y a su vez a mayor temperatura de recocido se notó que este fenómeno de inestabilidad, minimizó su amplitud y suavizó la curva esfuerzo deformación. Si bien es cierto que los aceros no deben ser utilizados sin el proceso de temple, es necesario enfatizar en esto, ya que las propiedades pueden ser mejores con niveles de temples inferiores al 2.44 %.

Figura 81. Cambios de la morfología de la curva esfuerzo vs deformación en la medida que aumenta la temperatura de recristalización.



4.3.1.7. Propiedades mecánicas obtenidas de la primera corrida de aceros IF después del temple.

Un vez realizado el proceso de temple para los rollos recocidos en la primera corrida del diseño de experimentos, se procedió a tomar muestras representativas de cada recocido, en total se caracterizaron 6 rollos de aceros IF, 2 para cada recocido.

Los resultados obtenidos clasificaron a los aceros IF como aceros de calidad embutición, sin embargo las propiedades mecánicas que revelan el buen comportamiento del acero durante los procesos de embutición como lo son la anisotropía plástica r y el índice de endurecimiento por deformación n , se encuentran con valores aptos para embutición profunda y algunos para extra profunda, sin importar la temperatura de recocido a la que fue sometido el material. Ver tabla 31.

Se hizo un análisis comparativo de las muestras caracterizadas con temple con las mismas muestras sin temple. En la tabla 32 se encuentran tabulados los resultados obtenidos de los ensayos para las propiedades mecánicas.

Tabla 31. Tabla resumen de las propiedades mecánicas obtenidas después del temple para los recocidos de 680°C, 690°C y 700°C de Acero IF.

Rollo	Espesor (mm)	Temperatura (°C)	Fluencia (Mpa)	Resistencia Max. (Mpa)	Elongación %	Dureza (HRB)	r	n	Δr
98643	0.6	680	216	299	40	39.2	2.1	0.17	0.27
99605	0.7	680	189	282	46	35.1	1.9	0.21	-0.29
98642	0.6	690	222	302	44	35.9	1.9	0.18	0.21
99606	0.6	690	225	306	43	41.2	2.1	0.20	0.44
99603	0.7	700	191	276	47	34.7	2.4	0.21	0.77
A1623	0.6	700	188	274	43	32.4	2.1	0.21	0.48
DS			150 - 240		> 36		1.3 - 1.7	0.17 - 0.22	
DDS			115 - 200		> 38		1.4 - 1.8	0.20 - 0.25	
EDDS			105 - 170		> 40		1.7 - 2.1	0.23 - 0.27	

Tabla 32. Tabla comparativa de las propiedades mecánicas con y sin temple para diferentes temperaturas de recocido de los aceros IF de la primera corrida

Rollo	Temperatura °C	r		n		Elongación %		Fluencia (Mpa)		Resistencia (Mpa)	
		S/T	C/T	S/T	C/T	S/T	C/T	S/T	C/T	S/T	C/T
98643	680	1.8	2.1	0.12	0.17	36	40	267	216	310	299
99605	680	1.6	1.9	0.15	0.21	42	46	250	189	303	282
98642	690	1.7	1.9	0.23	0.18	43	44	201	222	319	302
99606	690	1.7	2.1	0.25	0.20	40	43	177	225	313	306
99603	700	1.7	2.4	0.24	0.21	44	47	194	191	304	276
A1623	700	1.9	2.1	0.25	0.21	50	43	138	188	271	274

Los valores de la tabla marcados con rojo hacen parte de lo que no se quiere durante el proceso productivo de obtención de material IF para embutición, debido a que lo que se logró en el recocido, en el temple se afectó de forma negativa, a pesar de que la anisotropía plástica o índice r aumentó su valor de forma positiva durante el temple. Las propiedades mecánicas que se vieron afectadas de forma negativa fueron la fluencia, la resistencia máxima y el índice de endurecimiento por deformación. Estas propiedades para los aceros recocidos a 690°C y 700°C, aumentó para el caso de la fluencia después del temple y disminuyó para el caso de la resistencia máxima y el endurecimiento por deformación. Esto indica que la relación TS/YP se vio afectada de forma negativa (disminuyó), debido a que la fluencia subió y la resistencia bajo, y como esta relación es directamente proporcional al índice n, se explica entonces porque este también bajo, afectando por consiguiente la capacidad de estiramiento que puede tener el material.

Para el caso del recocido a 680°C del acero IF, las propiedades mecánicas se vieron afectadas de forma positiva, es decir: que así como el temple eliminó la inestabilidad o elongación del punto de fluencia, este nivel de temple fue suficiente también para bajar la fluencia sin generar endurecimiento por deformación y a su vez aumentar la anisotropía plástica o índice r y el endurecimiento por deformación o índice n al tener una relación TS/YP más amplia. Las curvas esfuerzo deformación antes y después de temple, mostraron la variación de las propiedades mecánicas con respecto al grado de temple, que para el caso de las pruebas fue de 2.44% para todas. Este es el grado de temple que por registros históricos se hace para los aceros SAE 1006 con destino a calidad comercial y que en la primera prueba se realizó en los aceros IF sin llegar a tener este comportamiento negativo para el caso de 690°C y 700°C. Ver figuras 82, 83 y 84.

Figura 82. Variación de la curva esfuerzo deformación después del temple en aceros IF recocidos a 680°C con $\Delta T < 10^\circ\text{C}$.

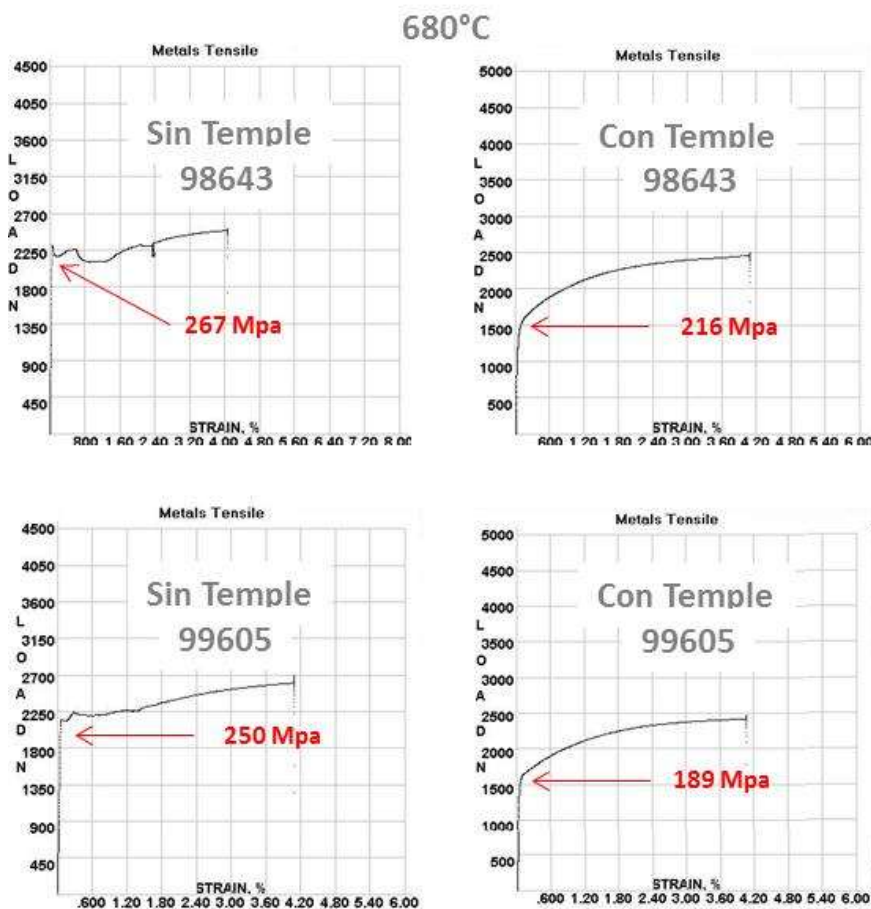


Figura 83. Variación de la curva esfuerzo deformación después del temple en aceros IF recocidos a 690°C con $\Delta T < 10^\circ\text{C}$.

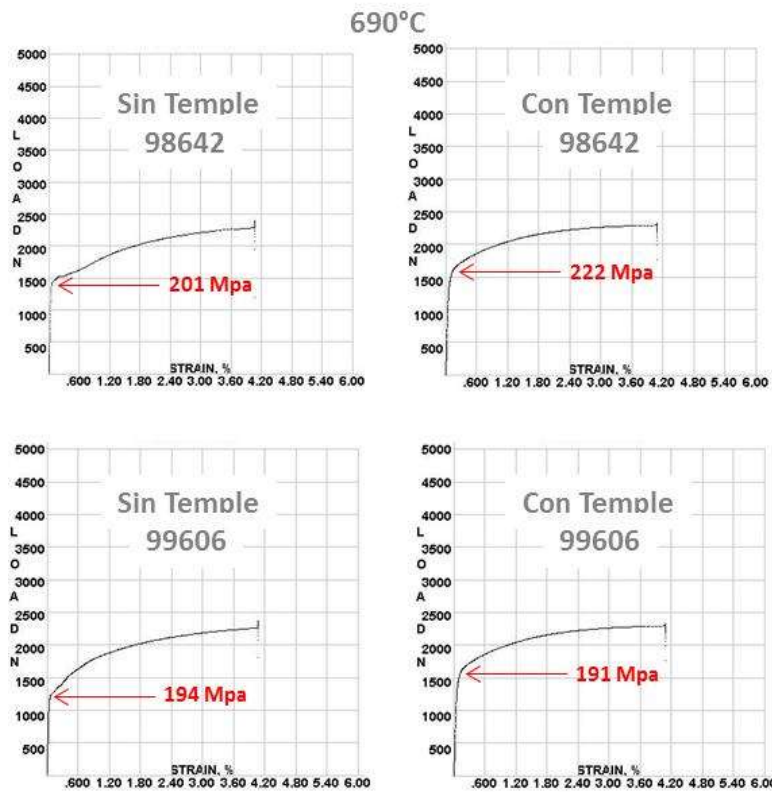
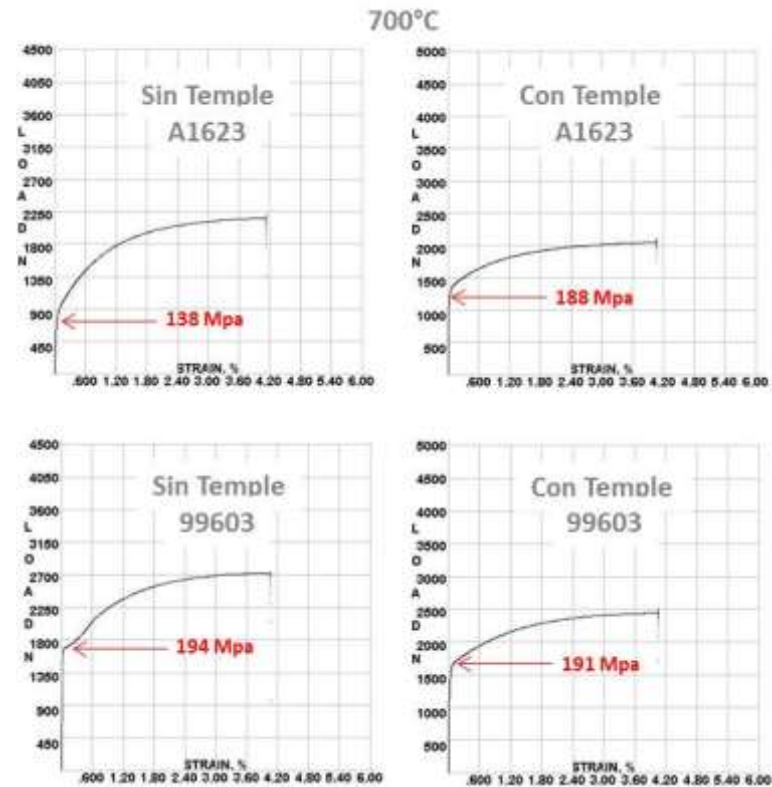


Figura 84. Variación de la curva esfuerzo deformación después del temple en aceros IF recocidos a 700°C con $\Delta T < 10^\circ\text{C}$.



4.3.2. Segunda corrida de aceros IF

La segunda corrida de aceros IF se hizo para los niveles establecidos (680°C, 690°C y 700°C) en el diseño de experimentos y con pesos de carga entre 55.000 kg y 60.000 kg. Esta corrida se hizo con el fin de tener información del recocido para un nivel de carga bajo con respecto al primer ciclo.

La composición química de los rollos libres de intersticios se ajustó a la de aceros libres de intersticios estabilizados con Titanio, igual que para la primera prueba realizada. La composición química de los 12 rollos escogidos se ve en la tabla 33.

Tabla 33. Composición química de los aceros IF estabilizados con Ti usados en la segunda corrida.

Bobina	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	N	Ti
A8810	0.0019	0.008	0.14	0.005	0.0049	0.005	0.0030	0.0029	0.0610
A8804	0.0016	0.007	0.10	0.012	0.0047	0.045	0.0022	0.0033	0.0610
A8805	0.0016	0.007	0.10	0.012	0.0047	0.045	0.0022	0.0033	0.0610
A8811	0.0024	0.012	0.11	0.012	0.0044	0.043	0.0022	0.0038	0.0600
A8808	0.0016	0.007	0.10	0.012	0.0047	0.045	0.0022	0.0033	0.0610
A8801	0.0016	0.007	0.10	0.012	0.0047	0.045	0.0022	0.0033	0.0610
A2555	0.0013	0.008	0.14	0.010	0.0092	0.036	0.0019	0.0010	0.0710
A8806	0.0016	0.007	0.10	0.012	0.0047	0.045	0.0022	0.0033	0.0610
A8803	0.0016	0.007	0.10	0.012	0.0047	0.045	0.0022	0.0033	0.0610
A8807	0.0016	0.007	0.10	0.012	0.0047	0.045	0.0022	0.0033	0.0610
A8802	0.0016	0.007	0.10	0.012	0.0047	0.045	0.0022	0.0033	0.0610
A8809	0.0016	0.007	0.10	0.012	0.0047	0.045	0.0022	0.0033	0.0610

Los rollos de acero libres de intersticios fueron cargados en las bases con una distribución que permitiera manejar pesos de carga similar. A continuación se relaciona la tabla con la información de carga y numero de rollos para cada temperatura de recocido.

Tabla 34. Acero IF cargado en cada recocido de acuerdo al diseño de experimentos.

POSICION DEL ROLLO	Temperatura : 680°C		Temperatura : 690°C		Temperatura : 700°C	
	Rollo	Espesor (mm)	Rollo	Espesor (mm)	Rollo	Espesor (mm)
1	A8811	0,45	A2555	0,45	A8803	0,45
2	A8810	0,45	A8806	0,45	A8809	0,45
3	A8804	0,45	A8808	0,45	A8802	0,45
4	A8805	0,45	A8801	0,45	A8807	0,45
Peso Carga (kg)	57925		60110		59415	

4.3.2.1. Recocido a temperatura de 680°C para la carga de 57.925 kg.

A continuación se relaciona el perfil térmico obtenido con las termocupas para la carga de acero IF de 57.925 Kg recocida a 680°C con $\Delta T < 10^\circ\text{C}$

Figura 85. Curva tratamiento térmico de acero IF a 680°C con $\Delta T < 10^\circ\text{C}$ para una carga de 57.925 kg.

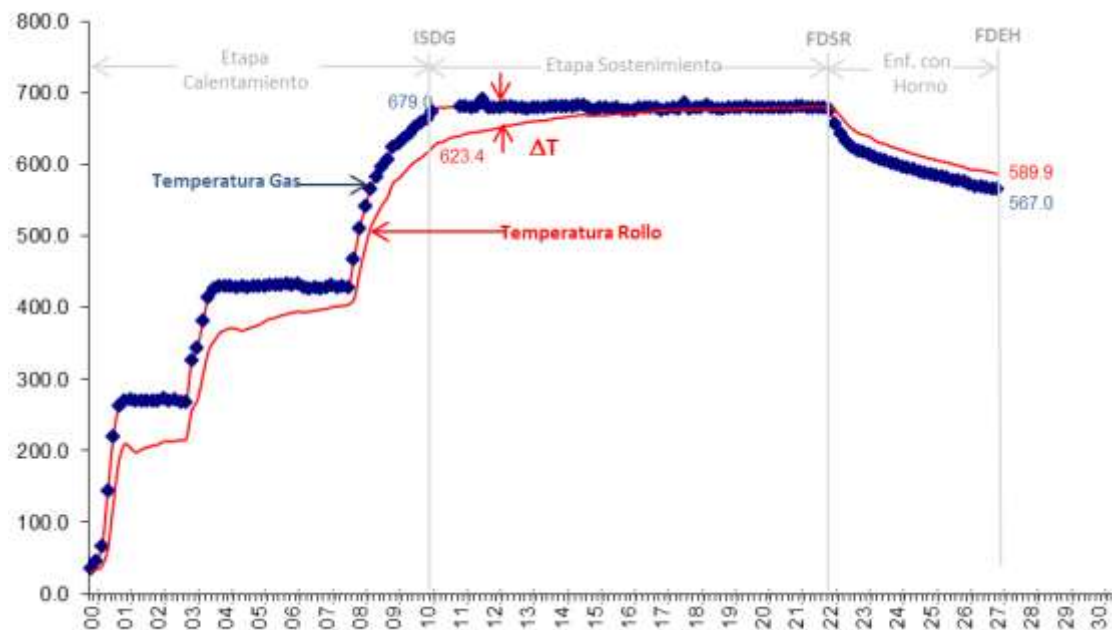


Tabla 35. Tabla resumen de los tiempos y temperaturas más relevantes del recocido a 680°C para carga de 57.925 kg de Acero IF.

RECOCIDO MATERIAL IF T= 680°C, Carga = 57.925 Ton.				
680°C	ISDG	ISDR	FDSR	FECH
Tiempo (hrs)	10.7	17.0	22.0	27.0
Rollo	636.4	675.1	679.9	586.5
Gas	680.0	676.0	675.0	565.5
ΔT (°C)	0.9			-21.0
Sostenimiento (hrs)	5.0			

4.3.2.2. Recocido a temperatura de 690°C para la carga de 60.110 kg.

A continuación se relaciona el perfil térmico obtenido con las termocupas para la carga de acero IF de 60.110 Kg recocida a 690°C con $\Delta T < 10^\circ\text{C}$

Figura 86. Curva tratamiento térmico de acero IF a 690°C con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ para una carga de 60.110 kg.

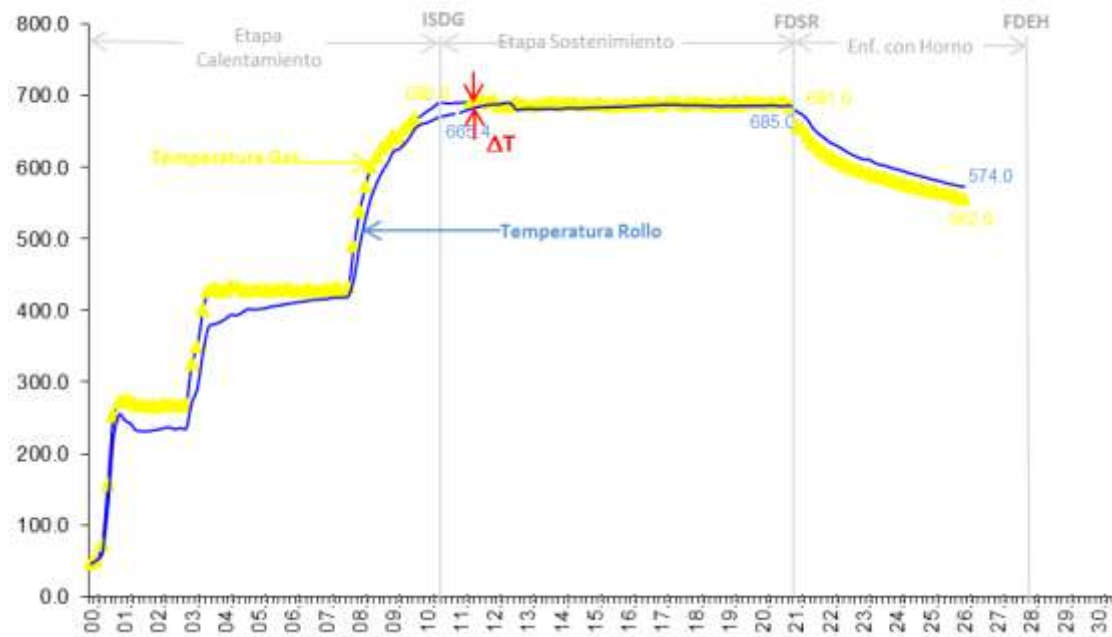


Tabla 36. Tabla resumen de los tiempos y temperaturas más relevantes del recocido a 690°C para carga de 60.110 kg de Acero IF.

RECOCIDO MATERIAL IF T= 690°C, Carga = 60.110 Ton.				
690°C	ISDG	ISDR	FDSR	FECH
Tiempo (hrs)	10.3	16.0	20.8	26.0
Rollo	674.5	690.4	695.8	573.1
Gas	690.0	691.0	685.0	556.0
$\Delta T (^{\circ}\text{C})$		0.6		-17.1
Sostenimiento (hrs)			4.8	

4.3.2.3. Recocido a temperatura de 700°C para la carga de 59.415 kg.

A continuación se relaciona el perfil térmico obtenido con las termocupas para la carga de acero IF de 59.415 Kg recocida a 700°C con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$

Figura 87. Curva tratamiento térmico de acero IF a 700°C con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ para una carga de 59.415 kg.

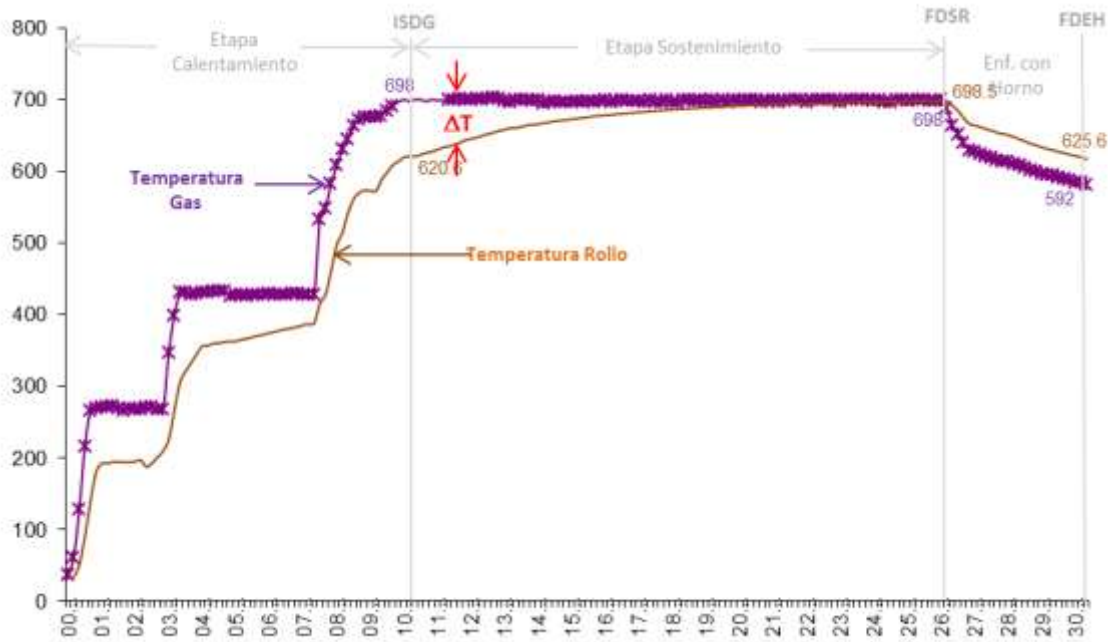
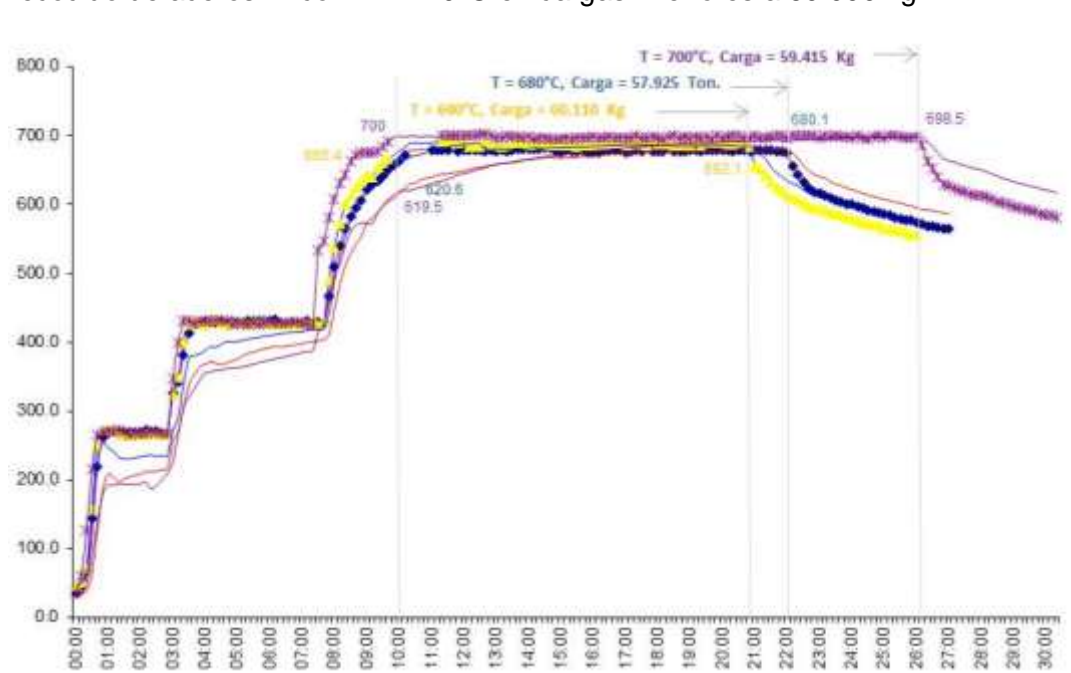


Tabla 37. Tabla resumen de los tiempos y temperaturas más relevantes del recocido a 700°C para carga de 59.415 kg de Acero IF.

RECOCIDO MATERIAL IF T= 700°C, Carga = 59.415 Ton.				
700°C	ISDG	ISDR	FDSR	FECH
Tiempo (hrs)	12.0	23.3	28.0	35.8
Rollo	620.9	695.1	698.8	580.0
Gas	698.0	699.0	687.0	544.0
$\Delta T (^{\circ}\text{C})$	3.9			-36.0
Sostenimiento (hrs)	4.7			

Los tiempos obtenidos en cada uno de los recocidos evidencian que el calentamiento del material fue más rápido en la base que realizó el recocido a 690°C. También se pudo detectar que la velocidad de calentamiento que experimentó el material en bajas cargas es mayor a la que se da en cargas mayores a 80.000 kg, esto se observó claramente en las curvas de los recocidos traslapadas a baja y alta carga. Lo anterior hace que los gradientes de temperatura se vieran mayormente favorecidos en los recocidos de baja carga. La figura 88 muestra el comportamiento de los 3 perfiles térmicos para los aceros IF recocidos a 680°C, 690°C y 700°C.

Figura 88. Perfil térmico de los 3 niveles de temperatura utilizados para realizar el recocido de aceros IF con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$ en cargas inferiores a 60.000 kg.



4.3.2.4. Propiedades mecánicas obtenidas de la segunda corrida de aceros IF después del temple.

Un vez realizado el proceso de temple para los rollos recocidos en la segunda corrida del diseño de experimentos, se procedió a tomar muestras representativas de cada recocido, en total se caracterizaron 11 rollos de aceros IF.

Tabla 38. Tabla resumen de las propiedades mecánicas obtenidas después del temple para la segunda corrida con cargas bajas para aceros IF.

Rollo	Espesor (mm)	Temperatura (°C)	Fluencia (Mpa)	Resistencia Max. (Mpa)	Elongación (%)	Dureza (HRB)	r	n	Δr
A8808	0.45	680	224	310	42	40.3	2.0	0.21	0.31
A8810	0.45	680	211	303	41	43.7	2.5	0.21	0.04
A2555	0.45	680	221	299	38	43.4	2.1	0.19	0.19
A8801	0.45	680	238	304	42	39.3	2.2	0.17	0.28
A8803	0.45	690	232	302	38	39.7	2.0	0.20	-0.01
A8804	0.45	690	213	295	43	43.0	2.2	0.20	0.32
A8807	0.45	690	204	288	45	40.8	2.4	0.21	0.42
A8805	0.45	690	209	293	40	39.4	2.1	0.20	-0.08
A8811	0.45	700	243	275	29	50.4	2.0	0.12	-0.03
A8806	0.45	700	196	284	44	40.5	2.0	0.25	0.11
A8802	0.45	700	224	302	32	42.2	2.0	0.24	0.04

Los resultados obtenidos clasificaron a los aceros IF como aceros de calidad embutición, sin embargo las propiedades mecánicas que revelan el buen comportamiento del acero durante los procesos de embutición como lo son la anisotropía plástica r y el índice de endurecimiento por deformación n , se encuentran en su mayoría con valores aptos para embutición profunda y algunos para extra profunda, sin importar la temperatura de recocido a la que fue sometido el material. Ver tabla 38.

4.4. CLASIFICACION DE ACEROS LIBRES DE INTERSTICIOS Y ANALISIS DE VARIANZA

4.4.1. Clasificación de las propiedades mecánicas

Teniendo en cuenta las propiedades mecánicas obtenidas durante todos los recocidos que formaron parte de la investigación, se hizo un análisis descriptivo e inferencial de estos resultados, con el fin de buscar los aspectos más relevantes del proceso de obtención de calidad embutición en aceros IF, para buscar las explicaciones científicas en las pruebas industriales.

En primer lugar, es necesario ubicar las propiedades mecánicas obtenidas en las pruebas dentro de lo especificado por la norma ASTM A 1008.

Tabla 39. Propiedades mecánicas obtenidas después del temple para el recocido de prueba a 690°C de la primera etapa de la investigación de los aceros IF.

Rollo	Temperatura °C	r	n	E %	Fluencia Mpa	Resistencia Mpa	Dureza HRB	Clasificación
97749	690	1.8	0.21	43	186	297	31.1	DDS
97750	690	1.8	0.20	45	202	296	32.4	DS
97751	690	1.8	0.20	39	200	297	36.6	DS
97752	690	2.0	0.19	37	203	300	36.5	DS
ASTM A 1008	DS	1.3 - 1.7	0.17 - 0.22	> 36	150 - 240	Embutición		
	DDS	1.4 - 1.8	0.20 - 0.25	> 38	115 - 200	Embutición Profunda		
	EDDS	1.7 - 2.1	0.23 - 0.27	> 40	105 - 170	Embutición Extra Profunda		

Al analizar los resultados de la tabla 39, tenemos en total 16 propiedades que deben ser clasificadas de acuerdo a norma ASTM A 1008 para 4 rollos que fueron sometidos a un recocido de recristalización a 690°C con DT de 10°C como fue registrado en los perfiles térmicos.

De las 16 propiedades obtenidas, en total solo 2 cumplieron con calidad extra profunda, 9 con calidad profunda y 5 con calidad de embutición, para una participación del 56 % de las propiedades como calidad embutición profunda, 31 % como de embutición y solo el 13 % como extra profunda, ver tabla 40.

Tabla 40. Participación de las propiedades en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 del recocido de prueba a 690°C de la primera etapa de la investigación de los aceros IF.

Clasificación	Propiedades	Participación
DS	5	31%
DDS	9	56%
EDDS	2	13%
Total	16	100%

Si tenemos en cuenta que las propiedades que clasifican como de embutición extra profunda también clasifican como profunda, tendremos que la participación de las propiedades de embutición profunda aumentaría a un 69 % y quedaríamos con el mismo 31 % de propiedades como calidad de embutición. Ver tabla 41.

Tabla 41. Participación de las propiedades en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 del recocido de prueba a 690°C de la primera etapa de la investigación de los aceros IF.

Clasificación	Propiedades	Participación
DS	5	31%
DDS	11	69%
Total	16	100%

Pero como las propiedades deben cumplir con la horizontal, es decir con el rollo, al final de los 4 rollos del recocido de prueba, el 75 % cumplió con la calidad de embutición y solo el 25 % con calidad embutición profunda, la razón de la diferencia se debe a que 5 de las propiedades que cumplían como de embutición, 3 correspondieron a la fluencia. Ver tabla 42.

Tabla 42. Participación de los rollos de acero IF en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 del recocido de prueba a 690°C de la primera etapa de la investigación.

Clasificación	Propiedades	Participación
DS	3	75%
DDS	1	25%
Total	4	100%

Tabla 43. Propiedades mecánicas obtenidas después del temple para la primera corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.

Rollo	Temperatura °C	r	n	E %	Fluencia Mpa	TS Mpa	Dureza HRB	Clasificación
99605	680	1.9	0.21	46	189	282	35.1	DDS
98643	680	2.1	0.17	40	216	299	39.2	DS
98645	690	1.9	0.21	48	186	282	32.9	DDS
98642	690	1.9	0.18	38	204	274	35.9	DS
99606	690	2.1	0.20	43	225	306	41.2	DS
99603	700	2.4	0.21	47	191	276	34.7	DDS
A1623	700	2.1	0.21	43	188	274	32.4	DDS
ASTM A 1008	DS	1.3 - 1.7	0.17 - 0.22	> 36	150 - 240	Embutición		
	DDS	1.4 - 1.8	0.20 - 0.25	> 38	115 - 200	Embutición Profunda		
	EDDS	1.7 - 2.1	0.23 - 0.27	> 40	105 - 170	Embutición Extra Profunda		

De los 7 rollos analizados, tenemos que las propiedades mecánicas a evaluar y clasificar fueron 28, de las cuales 18 se clasificaron de calidad extra profunda, 4 como calidad profunda y 6 de embutición de acuerdo a la tabla 43 y 44. Esto en términos de participación le da a las propiedades calidad de embutición un 21 % con respecto a un 79% que tiene la calidad de embutición profunda, teniendo en cuenta que el 64 % que inicialmente se clasificó como extra profunda, también clasifica como calidad profunda. Ver tabla 44 y 45.

Tabla 44. Participación de las propiedades en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 de la primera corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.

Clasificación	Propiedades	Participación
DS	6	21%
DDS	4	14%
EDDS	18	64%
Total	28	100%

Tabla 45. Participación de las propiedades en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 de la primera corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.

Clasificación	Propiedades	Participación
DS	6	21%
DDS	22	79%
Total	28	100%

Pero como la clasificación se debe dar al final sobre el rollo, tuvimos que los rollos que clasificaron en la primera corrida como calidad de embutición, correspondieron al 43 %

y como calidad de embutición profunda el 57 %, esto debido a que en 3 de las 28 propiedades analizadas, la fluencia clasificó como de embutición impactando la calidad de los 7 rollos. Ver tabla 46.

Tabla 46. Participación de los rollos de acero IF en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 de la primera corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.

Clasificación	Propiedades	Participación
DS	3	43%
DDS	4	57%
Total	7	100%

Tabla 47. Propiedades mecánicas obtenidas después del temple para la segunda corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.

Rollo	Temperatura °C	r	n	E %	Fluencia Mpa	Resistencia Mpa	Dureza HRB	Clasificación
A8808	680	2.0	0.21	42	224	310	40.3	DS
A8810	680	2.5	0.21	41	211	303	43.7	DS
A2555	680	2.1	0.19	38	221	299	43.4	DS
A8801	680	2.2	0.17	42	238	304	39.3	DS
A8803	690	2.0	0.20	38	232	302	39.7	DS
A8804	690	2.2	0.20	43	213	295	43.0	DS
A8807	690	2.4	0.21	45	204	288	40.8	DS
A8805	690	2.1	0.20	40	209	293	39.4	DS
A8806	700	2.0	0.25	44	196	284	40.5	EDDS
A8802	700	2.0	0.24	42	224	302	32.2	DS
ASTM A 1008	DS	1.3 - 1.7	0.17 - 0.22	> 36	150 - 240	Embutición		
	DDS	1.4 - 1.8	0.20 - 0.25	> 38	115 - 200	Embutición Profunda		
	EDDS	1.7 - 2.1	0.23 - 0.27	> 40	105 - 170	Embutición Extra Profunda		

Para la segunda corrida se tomaron para análisis 10 rollos que en total corresponden a 40 propiedades mecánicas a clasificar. De las 40 propiedades mecánicas, 21 propiedades clasifican como extra profunda, 8 como profunda y 11 como de embutición. Ver tabla 48. Teniendo en cuenta que las propiedades de calidad extra profunda también clasifican como profunda, tuvimos que 29 propiedades clasificaron como de embutición profunda y 11 como de embutición, para una participación del 73% como profunda y solo el 27% como de embutición. Ver tabla 49.

En cuanto al análisis para los rollos, debemos mencionar que en 9 de los 11 rollos analizados, la fluencia como propiedad clasificó como de embutición, esto quiere decir que el 90% de los rollos clasificó como de embutición y solo el 10 % como de embutición profunda. Ver tabla 50.

Tabla 48. Participación de las propiedades en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 de la segunda corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.

Clasificación	Propiedades	Participación
DS	11	28%
DDS	8	20%
EDDS	21	53%
Total	40	100%

Tabla 49. Participación de las propiedades en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 de la segunda corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.

Clasificación	Propiedades	Participación
DS	11	27%
DDS	29	73%
Total	40	100%

Tabla 50. Participación de los rollos de acero IF en la clasificación de acuerdo a norma ASTM A 1008 de la segunda corrida de recocidos a 680°C, 690°C y 700°C para aceros IF.

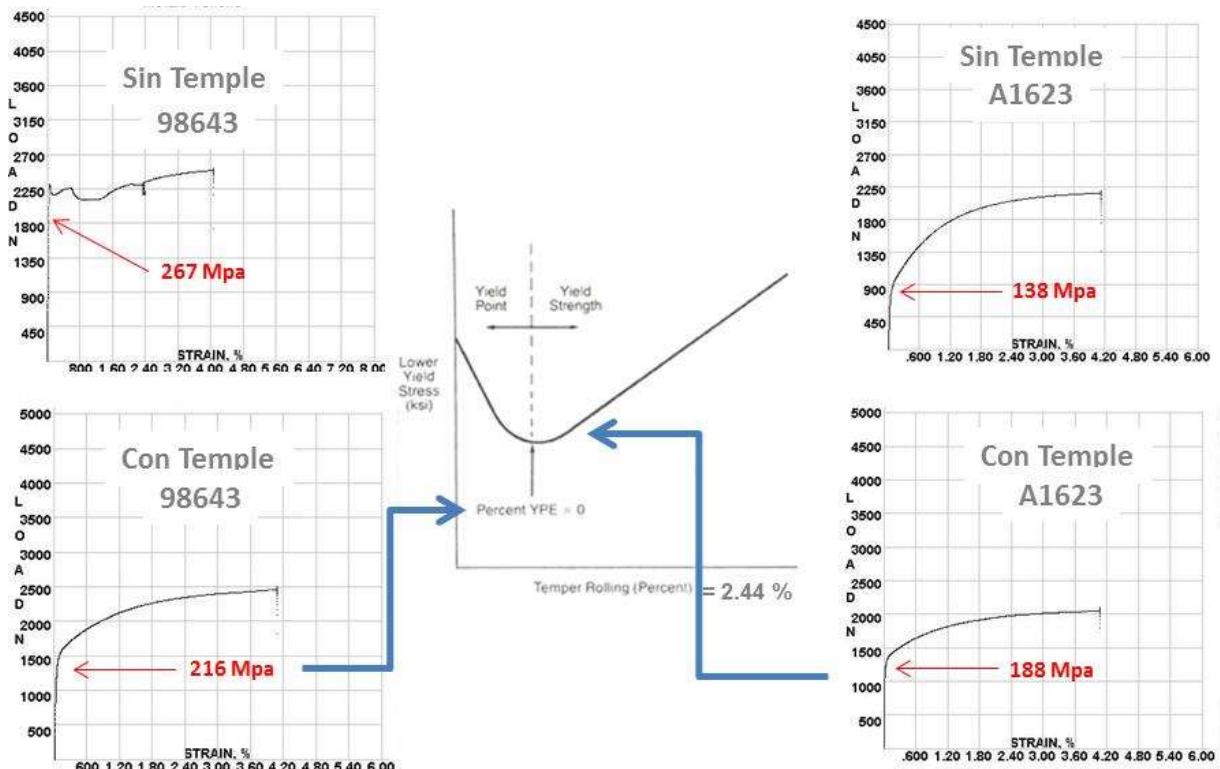
Clasificación	Propiedades	Participación
DS	9	90%
DDS	1	10%
Total	10	100%

También es importante comentar que ninguna de las propiedades que clasificó como de embutición correspondió a la anisotropía plástica y las propiedades diferentes a la fluencia que clasificaron como de embutición se encontró en 5 oportunidades el índice n o de endurecimiento por deformación, el cual por todo lo que hemos visto, se encuentra ligado al nivel de temple y por consiguiente a la elongación del punto de fluencia. Si hay más temple del necesario afecta de forma negativa la fluencia. Ver figura 89.

4.4.2. Análisis de Varianza

En este punto de la investigación se hace necesario evaluar de forma inferencial los resultados obtenidos en toda la investigación, con el propósito de buscar las variables de la operación que son determinantes para obtener calidad embutición en aceros IF estabilizados con titanio y que propiedades mecánicas del acero son sensibles a las variaciones del proceso.

Figura 89. Ejemplo del impacto negativo encontrado en la investigación que tiene el temple sobre la fluencia y sobre la eliminación de la elongación del punto de fluencia.



4.4.2.1. Análisis de Varianza para el tipo de acero

Para la evaluación se hicieron todas las consideraciones necesarias, teniendo en cuenta las pruebas realizadas. La primera evaluación tuvo que ver con la habilidad que presenta en la deformación el tipo de material a utilizar. Por esta razón analizamos con respecto a las propiedades mecánicas la incidencia que tiene el tipo de material en la deformación, ya sea SAE 1006 DDQ o aceros libre de intersticios calidad embutición.

Se tomaron los resultados de las caracterizaciones de los aceros SAE 1006 calidad DDQ y los resultados para el mismo espesor de material de los recocidos de la investigación y se realizó el análisis de varianza tomando como nivel de análisis el tipo de material.

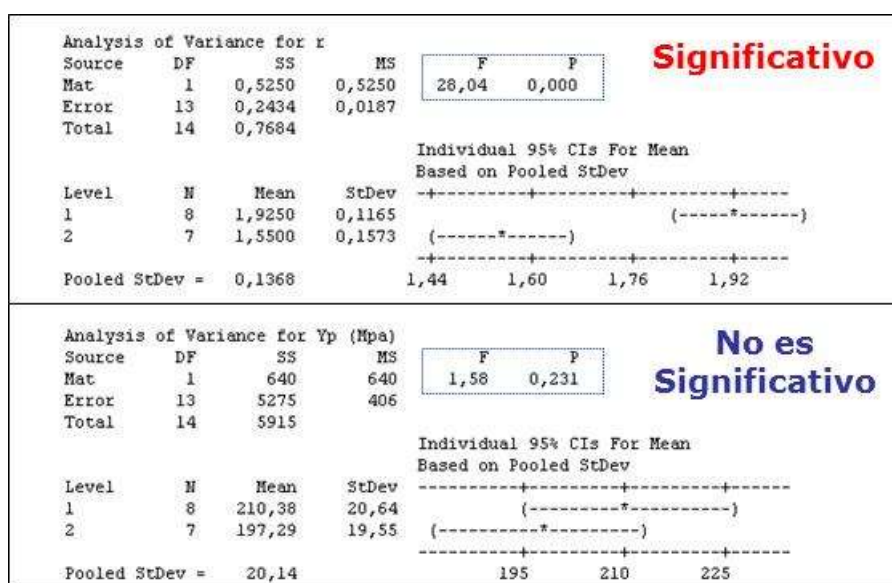
Tabla 51. Tabulación de las propiedades mecánicas obtenidas en las caracterizaciones de los aceros IF y los aceros SAE 1006 calidad DDQ.

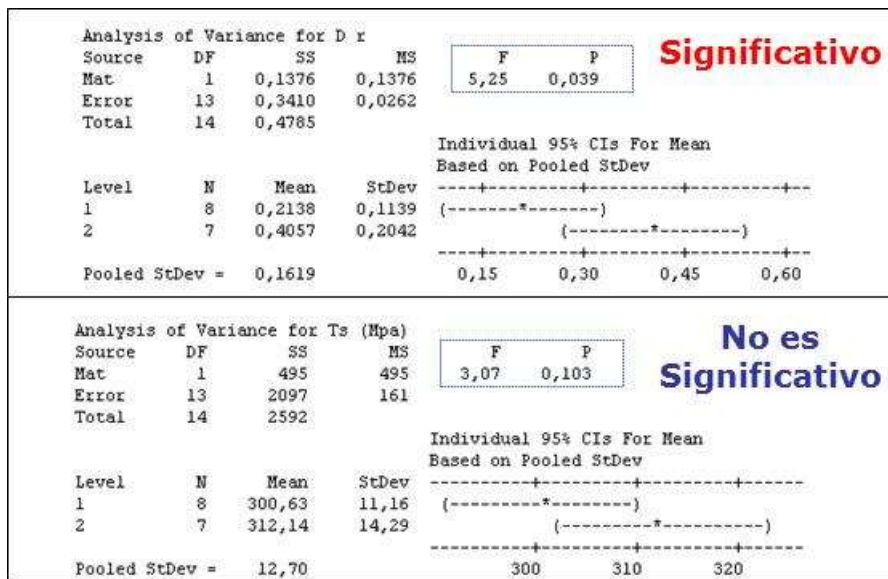
Rollo	Espesor	r	n	D r	E %	Fluencia Mpa	Resistencia Mpa	Dureza HRB	MATERIAL
A8806	0.45	2.0	0.25	0.11	44.0	196	284	41	IF
A8808	0.45	2.0	0.21	0.31	42.0	224	310	40	IF
A2555	0.45	2.1	0.19	0.19	35.0	221	299	43	IF
11120	0.45	1.4	0.21	0.01	30.0	227	338	40	SAE 1006
12063	0.45	1.5	0.21	0.33	34.0	209	317	38	SAE 1006
11136	0.45	1.5	0.20	0.42	39.8	213	316	38	SAE 1006
97749	0.60	1.8	0.21	0.39	43.0	186	297	31	IF
97750	0.60	1.8	0.20	0.33	45.0	202	296	32	IF
97751	0.60	1.8	0.20	0.17	39.0	200	297	37	IF
97752	0.60	2.0	0.19	0.11	37.0	203	300	37	IF
97753	0.60	1.9	0.19	0.10	35.0	251	322	39	IF
11178	0.60	1.7	0.22	0.55	44.0	189	293	33	SAE 1006
11195	0.60	1.7	0.24	0.57	41.4	172	301	32	SAE 1006
11196	0.60	1.7	0.24	0.60	45.4	181	307	33	SAE 1006
11204	0.60	1.3	0.23	0.36	40.8	190	313	31	SAE 1006

El análisis de varianza fue realizado en el software estadístico Minitab, obteniendo los siguientes resultados.

Figura 90. Resultados del análisis de varianza hecho en Minitab para determinar el grado de sensibilidad que tienen las propiedades mecánicas de acuerdo al tipo de material.

$$F_{0.05, V1, V2} = 4.67$$





Los resultados presentan a la anisotropía plástica del acero y su anisotropía planar, como las propiedades mecánicas que se hacen determinantes a la hora de utilizar aceros libres de intersticios o aceros SAE 1006 DDQ. Lo anterior fue visto durante la comparación de las propiedades, en donde se mostraba el índice r y la anisotropía planar en los IF como las propiedades mecánicas que hacían la diferencia a la hora de determinar la capacidad de deformación y tendencia a la formación de orejas con respecto a los aceros SAE 1006 DDQ. Esta claramente establecido que la anisotropía, depende en gran parte de la textura del material y de su naturaleza.

Las otras propiedades mecánicas, caso Fluencia y Resistencia máxima, son características que obviamente van a depender de la composición química del acero, pero también dependerán de muchos factores externos a su composición como lo es el proceso de transformación, caso niveles de temple que ya se vio claramente cómo afecta a estas últimas propiedades mecánicas que se comportaron como no significativas a la hora de comparar el tipo de acero.

De igual forma se hicieron los análisis de varianza para cada espesor caracterizado, tomando la información de la tabla 51 con el fin de ver si seguía presentando consistencia los resultados de la anisotropía y hubo nuevamente validación en el grado de significancia que tiene la anisotropía sobre el tipo de acero. Ver figura 91.

Figura 91. Resultados del análisis de varianza realizado en Minitab para determinar el grado de sensibilidad que tienen las propiedades mecánicas de acuerdo al tipo de material para los resultados de 0.45 mm.

$$F_{0.05, v_1, v_2} = 7.71$$

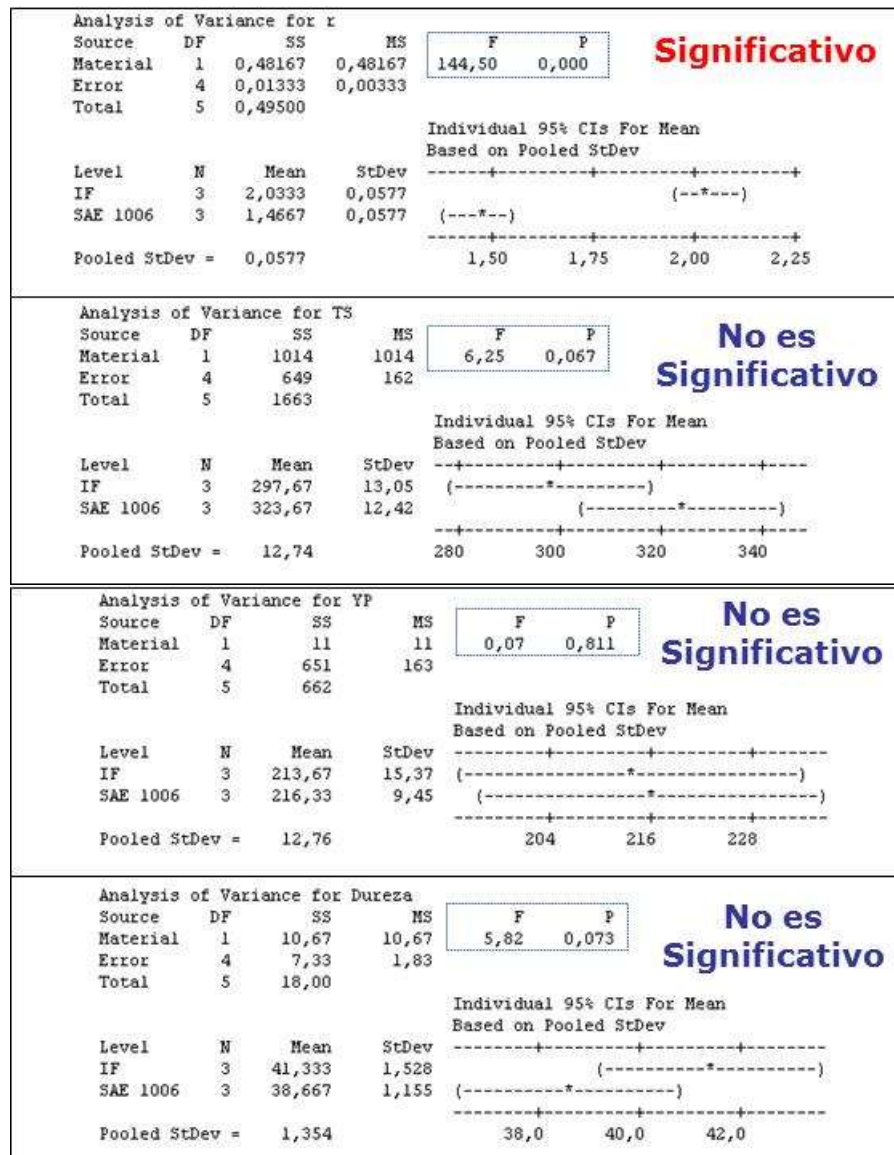
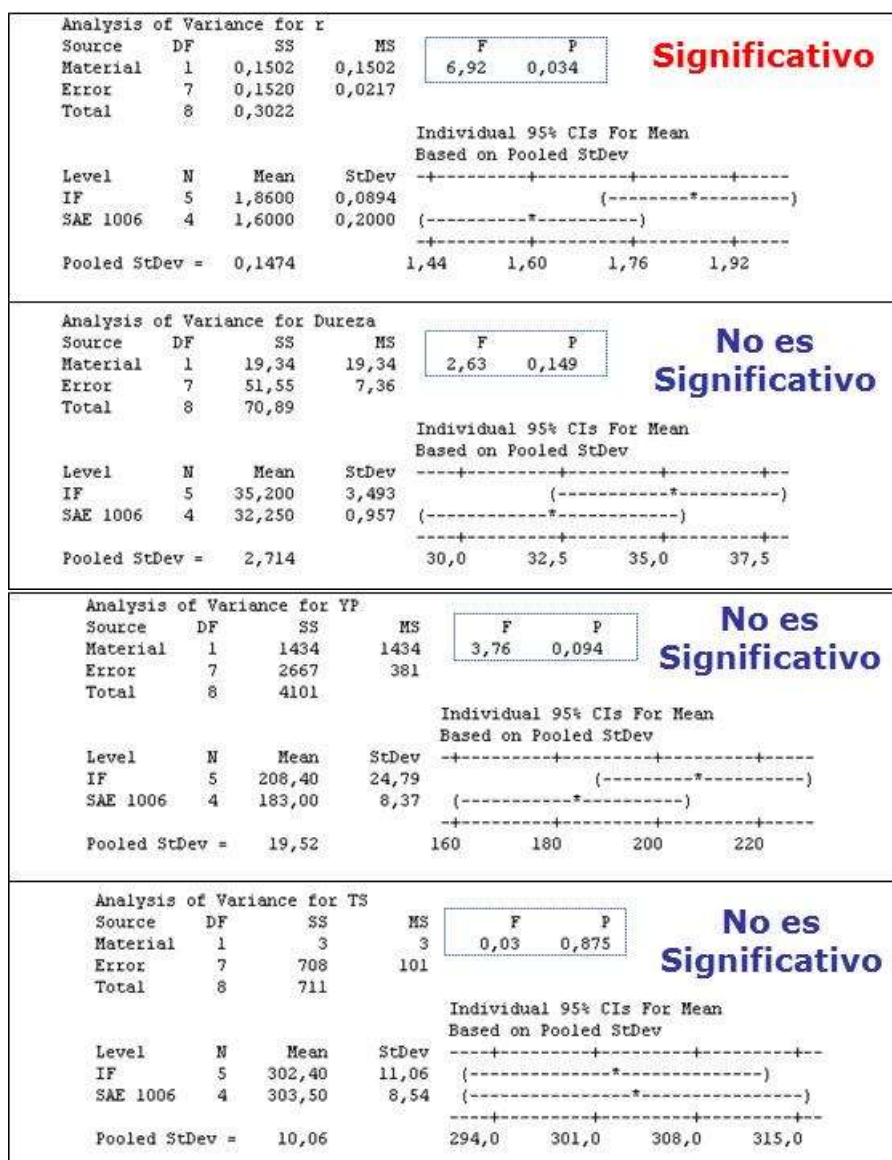


Figura 92. Resultados del análisis de varianza realizado en Minitab para determinar el grado de sensibilidad que tienen las propiedades mecánicas de acuerdo al tipo de material para los resultados de 0.60 mm.

$F_{0.05, V1, V2} = 5.59$



4.4.2.2. Análisis de Varianza para la temperatura de recristalización

Con el fin de analizar la temperatura de recristalización de los recocido para buscar elementos de juicio que permitan dentro de la investigación generar información relevante para optimizar el proceso de fabricación de aceros IF para embutición, se hicieron los respectivos análisis de varianza, tomando como variable de evaluación la temperatura de recristalización que se trabajó en 4 niveles, analizando la información

de las propiedades mecánicas antes y después del temple. Este análisis es fundamental, debido a que los recocidos buscando gradientes de temperatura menor a 10°C son muy extensos en su última etapa de calentamiento y mucho más si son realizados a temperatura de recristalización de 700°C. Esto baja los niveles de producción industrial en casi un 30%. La tabla 52 tabula los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas antes de Temple.

Tabla 52. Tabulación de las propiedades mecánicas obtenidas sin el temple en la primera corrida a cargas entre 80.000 kg y 90.000 kg para las diferentes temperaturas de recristalización de los aceros IF estabilizados con Titanio.

Rollo	Espesor mm	Temperatura °C	Dureza HRB	r	n	Δr	Elongación %	Fluencia Mpa	Resistencia Mpa
A1619	0.88	670	35	1.6	0.28	0.24	45	192	315
99159	0.60	670	45	1.6	0.17	0.30	44	250	316
99156	0.70	670	47	1.7	0.17	0.27	37	263	325
97739	0.75	670	46	1.6	0.20	-0.04	40	237	326
99605	0.71	680	45	1.6	0.15	0.11	42	250	303
99166	0.76	680	42	1.7	0.15	-0.09	39	243	309
97738	0.91	680	48	1.4	0.17	-0.08	37	260	331
98643	0.61	680	50	1.8	0.12	-0.01	36	267	310
97753	0.63	690	46	1.6	0.17	0.19	38	260	327
98645	0.71	690	42	1.3	0.20	0.27	40	243	323
98631	0.77	690	44	2.0	0.20	-0.20	40	245	318
99167	0.92	690	48	1.2	0.19	0.19	42	253	321
99603	0.73	700	37	1.7	0.24	0.32	44	194	304
98632	0.94	700	31	1.8	0.29	0.54	54	149	278
A1623	0.65	700	33	1.9	0.25	0.18	50	138	271
99153	0.60	700	44	1.5	0.17	-0.02	45	263	316

El análisis de varianza para medir el grado de sensibilidad que tienen las propiedades mecánicas con respecto al cambio de temperatura después de recocido el acero libre de intersticios y sin aún haber realizado temple, determino que la anisotropía plástica de los aceros antes de templar no es significativa en los niveles de temperatura en que se movió la investigación a pesar de que esta propiedad es la que rige el nivel de deformación preferencial que tendrá el material sobre su plano de laminación sin sufrir adelgazamiento, la cual guarda una fuerte relación con la recristalización de los aceros y su textura. Sin embargo es necesario tener en cuenta dentro de este análisis, que los aceros libres de intersticios que se analizaron tienen una buena proporción de titanio en exceso para precipitar cualquier elemento intersticial y a su vez bajar la temperatura de recristalización para los procesos de recocido. Con esta información es relevante mencionar que los aceros de la investigación a 680°C, 690°C y 700°C,

arrojaron tamaños de grano ASTM E 112 entre 8 y 9, con una recristalización total y no parcial de su estructura granular.

Para el caso de la fluencia, resistencia, elongación y dureza, resultó significativa la variación de temperatura y es entendible, debido a que los aceros una vez han sido recocidos, presentan inestabilidad en su punto de fluencia, fenómeno llamado elongación del punto de fluencia, el cual dependiendo de su amplitud, dependerá también el resultado de la propiedad. Esto se evidenció claramente en las curvas esfuerzo deformación que se encuentran registradas en la figura 81 del reporte de la investigación, en donde se vio la tendencia de los aceros IF estabilizados con titanio a disminuir paulatinamente el YPE en la medida en que va aumentando la temperatura de recristalización del recocido. Ver resultados del análisis de varianza en la figura 93.

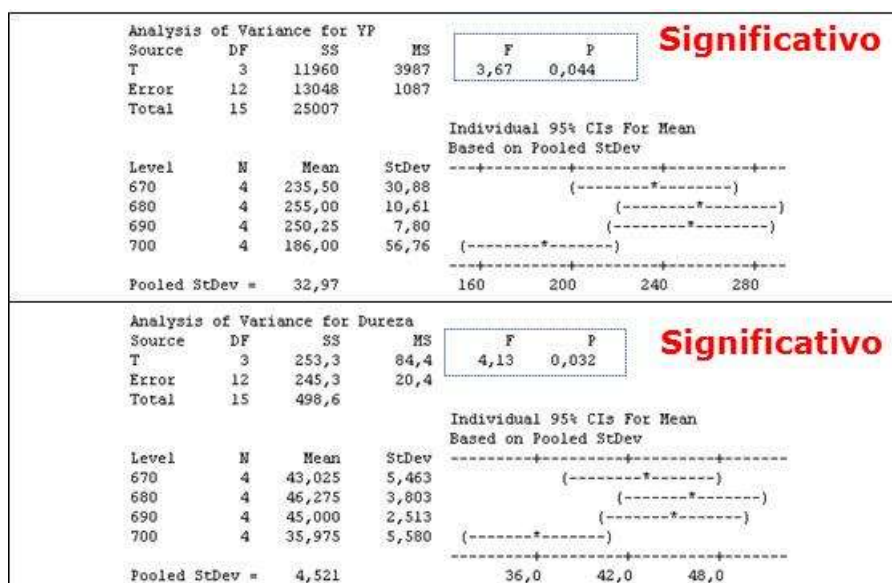
Figura 93. Resultados del análisis de varianza realizado en Minitab para determinar el grado de sensibilidad que tienen las propiedades mecánicas de los aceros IF recocidos y sin templar con respecto a la temperatura de recristalización.

$F_{0.05, v1, v2} = 3.49$

Anisotropía "r"

F P
0,56 0,651

**No es
Significativo**



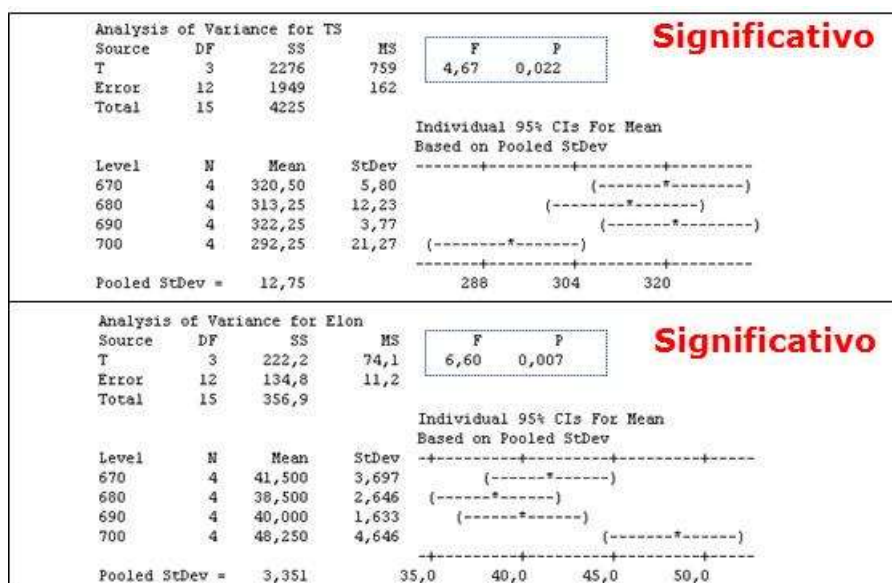


Tabla 53. Tabulación de las propiedades mecánicas obtenidas con el temple en la primera corrida a cargas entre 80.000 kg y 90.000 kg para las diferentes temperaturas de recristalización de los aceros IF estabilizados con Titanio.

Rollo	Espesor mm	Temperatura °C	Dureza HRB	r	n	Elongación %	Fluencia Mpa	Resistencia Mpa
98643	0.60	680	39	2.1	0.17	40	216	299
99605	0.70	680	35	1.9	0.21	46	189	282
98642	0.60	690	36	1.9	0.18	38	204	274
98645	0.70	690	33	1.9	0.21	48	186	282
A1623	0.60	700	32	2.1	0.21	43	188	274
99603	0.70	700	35	2.4	0.21	47	191	276

Tabla 54. Tabulación de las propiedades mecánicas obtenidas con el temple en la segunda corrida a cargas entre 50.000 kg y 60.000 kg para las diferentes temperaturas de recristalización de los aceros IF estabilizados con Titanio.

Rollo	Espesor mm	Temperatura °C	Dureza HRB	r	n	Elongación %	Fluencia Mpa	Resistencia Mpa
A8808	0.45	680	40.3	2.0	0.21	42	224	310
A8810	0.45	680	43.7	2.5	0.21	41	211	303
A2555	0.45	680	43.4	2.1	0.19	38	221	299
A8801	0.45	680	39.3	2.2	0.17	42	238	304
A8803	0.45	690	39.7	2.0	0.20	38	232	302
A8804	0.45	690	43.0	2.2	0.20	43	213	295
A8807	0.45	690	40.8	2.4	0.21	45	204	288
A8805	0.45	690	39.4	2.1	0.20	40	209	293
A8806	0.45	700	40.5	2.0	0.25	44	196	284
A8802	0.45	700	32.2	2.0	0.24	42	224	302

El análisis de varianza para los aceros ya templados mostró que el índice de endurecimiento por deformación n quien nos trasmite la capacidad de estiramiento que puede sufrir el material con deformación plástica homogénea y sin sufrir estricción, resultó significativo después del temple. Esto indica que el nivel de temple de un acero IF estabilizado con titanio que ha sido recocido en los niveles de temperatura de recristalización definidos en esta investigación debe ser diferente, si tenemos en cuenta que con la temperatura la elongación del punto de fluencia va disminuyendo así como su morfología va cambiando, se va haciendo más suave.

Al producir el material, el proceso productivo programó los temples de acuerdo a como lo hace con la calidad comercial, reduciendo el espesor después de ser el acero recocido en un 2.44%, si tenemos en cuenta que la temperatura de recristalización modificó la curva en su YPE, el temple lo que hizo fue afectar negativamente las propiedades, acercando la fluencia a la resistencia, lo que derivó una relación TS/YP más baja y por consiguiente alteró el índice n . Esto también se puede notar en los análisis descriptivos y en las figuras 81 y 89.

Para las demás propiedades mecánicas que resultaron no significativas, es preciso comentar que al tener un nivel de temple que afectó negativamente el endurecimiento por deformación, o mejor aún que afectó parcialmente de forma negativa lo conseguido en el recocido, este porcentaje de reducción alteró la fluencia de tal forma que la acercó entre los valores obtenidos para todos los aceros IF de la campaña, generando al final diferencias no significativas entre los tres niveles de recristalización.

Con respecto a la anisotropía, el nivel de temple fue suficiente para alterar el buen valor conseguido por el recocido que acercó los valores para los niveles estudiados, haciendo que el análisis de varianza no encontrara elementos matemáticos para declarar la propiedad significativa. En la figura 94 se aprecian los análisis de varianza para las propiedades mecánicas, con respecto a los niveles de temperatura evaluados en el proceso de recocido de recristalización y templado de los aceros IF.

Figura 94. Resultados del análisis de varianza realizado en Minitab para determinar el grado de sensibilidad que tienen las propiedades mecánicas de los aceros IF recocidos y templados en la primera corrida de la investigación con respecto a la temperatura de recristalización.

$F_{0.05, v_1, v_2} = 9.55$

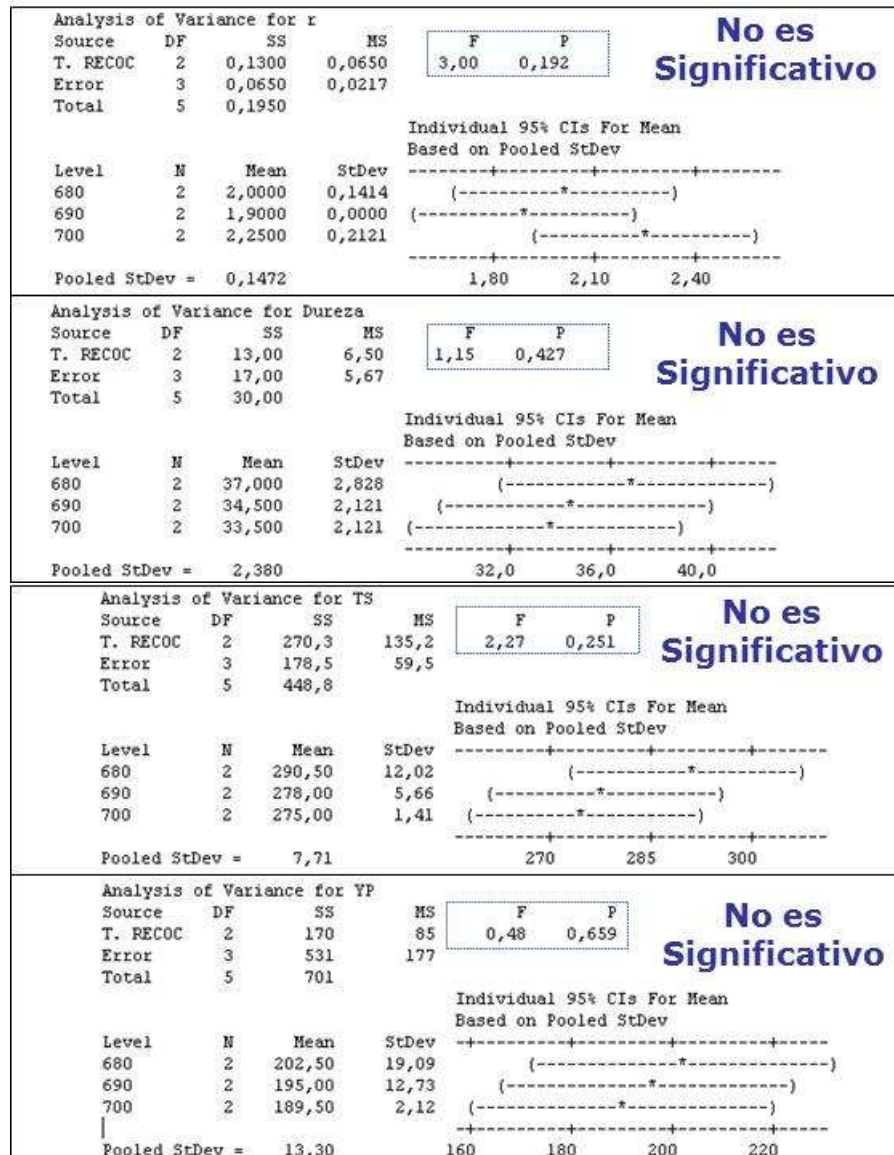
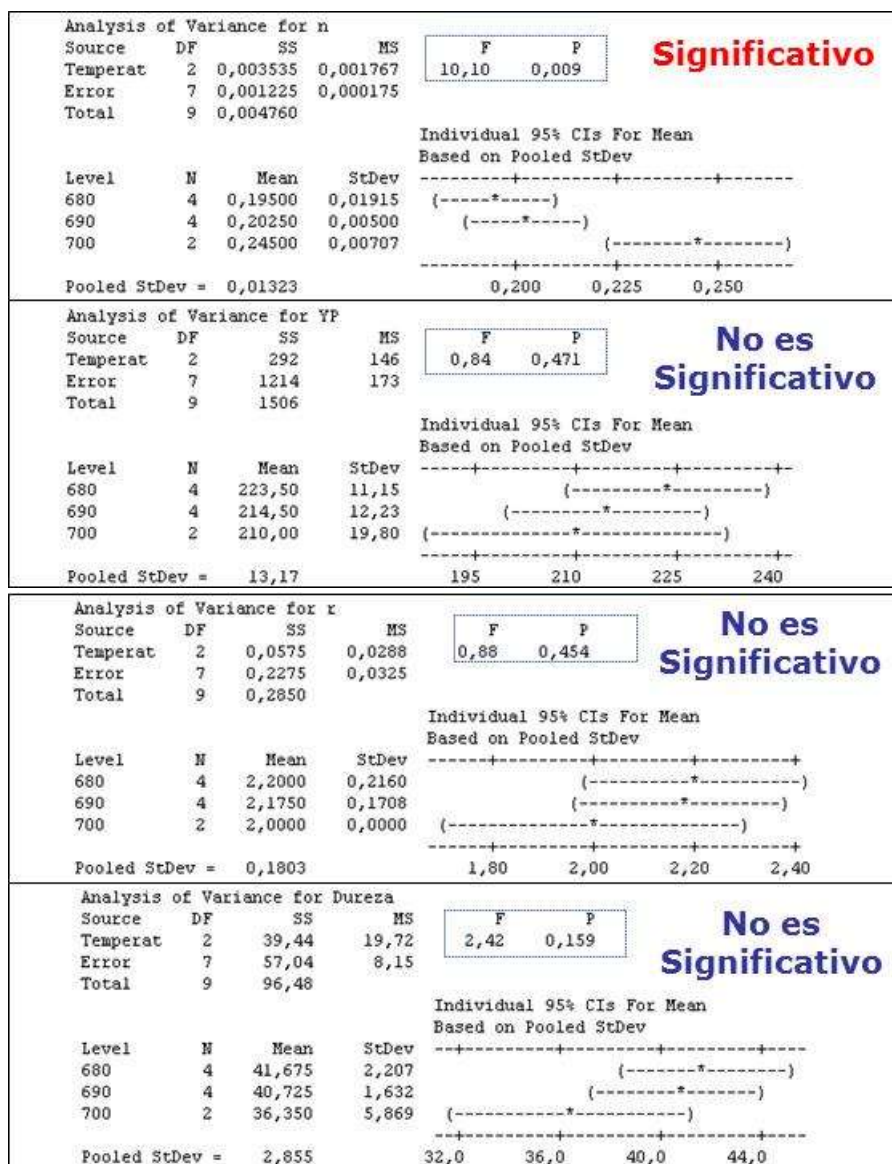


Figura 95. Resultados del análisis de varianza realizado en Minitab para determinar el grado de sensibilidad que tienen las propiedades mecánicas de los aceros IF recocidos y templados en la segunda corrida de la investigación con respecto a la temperatura de recristalización.

$F_{0.05, V1, V2} = 4.74$



4.4.3. Proyección del tiempo de calentamiento en función de la carga

Teniendo en cuenta que este tipo de investigaciones en las cuales el estudio se hace a nivel industrial, debido a lo complejo que es reproducir la información en el laboratorio, pero adicional a esto, también lo complejo que resulta hacer la investigación a nivel industrial, por lo que tiene que ver con el proceso de colocación de las termocupas y el tiempo que demanda esto. Es necesario aprovechar esta información y reproducirla

de forma aproximada a través de cálculos matemáticos para dejar una herramienta que permita a los operadores, asignar tiempos de recocido cuando se trate de cargas especiales en su calidad final. La tabla 55 tabula la información de los perfiles térmicos construidos en los recocidos de la investigación para los dos niveles de carga. Con estos dos niveles se pretendió cubrir una gama significativa de los recocidos hechos por ACESCO.

Tabla 55. Tabulación de los tiempos y temperaturas encontrados durante los recocidos de recristalización realizados a aceros IF con $\Delta T < 10^{\circ}\text{C}$

Recocido	Gas ($^{\circ}\text{C}$)	Rollo ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo (hrs)	Carga (Kg)
1	680	675	36	83525
2	690	685	29	84045
3	700	695	44	83425
4	680	675	22	57925
5	690	685	21	60110
6	700	695	26	59415

Figura 96. Ecuación encontrada para cada temperatura de recristalización en los dos niveles de carga utilizados.

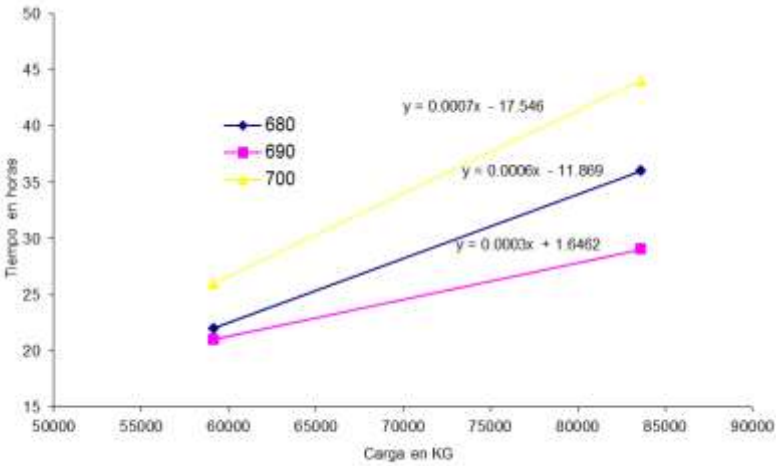


Tabla 56. Datos hallados por las ecuaciones, para diferentes niveles de carga utilizando los mismos gradientes de temperatura del acero.

Peso Carga	Tiempo de Calentamiento		
Kg	680°C	690°C	700°C
55000	21.1	18.1	21.0
60000	24.1	19.6	24.5
65000	27.1	21.1	28.0
70000	30.1	22.6	31.5
75000	33.1	24.1	35.0
80000	36.1	25.6	38.5
85000	39.1	27.1	42.0

5. CONCLUSIONES

5.1. Los aceros libres de intersticios, son aceros que bajo los mismos procesos de transformación para obtener calidad de embutición, presentan mejores características de conformabilidad que los aceros convencionales calmados al aluminio SAE 1006 con calidad DDQ, esto debido a su excelente grado de anisotropía, que le da mayor capacidad de deformación sobre el plano de laminación sin sufrir adelgazamientos pronunciados en su espesor, así como también, tener menor tendencia a la formación de orejas por su excelente anisotropía planar y mayor capacidad de estiramiento por su excelente índice de endurecimiento y capacidad de distribuir homogéneamente su deformación plástica.

5.2. Los aceros libres de intersticios estabilizados con titanio, a temperatura de recrystalización de 680°C, presentaron en su estructura recrystalización total con grano equiaxial, diferente a la de los aceros SAE 1006 DDQ, en donde su microestructura es de grano Pancake.

5.3. Las propiedades mecánicas de los aceros libres de intersticios estabilizados con titanio se ven afectadas de forma positiva con el aumento de temperatura, es decir que a temperaturas superiores a 680°C su resistencia a la fluencia y resistencia máxima disminuyen y su elongación e índice de endurecimiento por deformación aumentan, disminuyendo considerablemente con la temperatura la amplitud de la elongación del punto de fluencia, así como la morfología de esta zona en la curva esfuerzo deformación como una zona más suave entre la transición de la zona de comportamiento elástico y la zona de comportamiento plástico.

5.4. La anisotropía plástica de los aceros libres de intersticios no se ve afectada con la temperatura después de 670°C. Se mantuvo no significativa a la variación, a pesar de que las demás propiedades mecánicas si se afectaron positivamente, esto indica que siendo esta la variable que rige la capacidad de deformación en el embutido de los aceros, es posible pensar en temperaturas de recrystalización inferiores a 690°C con el fin de disminuir los tiempos de recocido, sin afectar la condición de embutibilidad del material.

5.5. Los niveles de temple de los aceros libres de intersticios deben ser diferentes dependiendo de la temperatura de recrystalización a la que estos sean sometidos durante el tratamiento térmico de recocido, esto debido a que en la medida que aumenta la temperatura de recrystalización, disminuye la elongación del punto de

fluencia, así como también la morfología de la transición de zona elástica a plástica. Si no se tiene en cuenta esto y se aplica el mismo grado de temple después de ser recocido el acero IF, se afectarán negativamente las propiedades mecánicas como la resistencia a la fluencia, resistencia máxima y el endurecimiento por deformación, lo que hace perder el nivel de embutibilidad que alcanzó por efecto del tratamiento térmico de recocido.

5.6. La variable más sensible a cualquier cambio dentro del proceso de transformación, ya sea durante el recocido o dependiendo del nivel de temple y que descalifica las propiedades mecánicas de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM A 1008 para buscar las calidades de embutición, embutición profunda y extra profunda, es el esfuerzo de fluencia. A pesar de que todos los aceros presentaban excelente anisotropía y calificaban dentro de calidades como la extra profunda o profunda, esta propiedad con pequeñas variaciones en los procesos, cambio de forma significativa los resultados de clasificación, bajando a los aceros en uno o dos niveles su grado de embutición.

5.7. El índice de endurecimiento por deformación n se encuentra directamente relacionado al nivel de temple que se le dé al acero libre de intersticios después del recocido, debido a que de esta variable dependerá la relación TS/YP . En la medida en que el valor se fue acercando a 1, la capacidad de endurecimiento por deformación medido como la pendiente logarítmica de la curva esfuerzo deformación en la zona plástica fue disminuyendo. Es por esta razón que los niveles de temple deben disminuir en la medida que aumenta la temperatura de recristalización del recocido para aceros IF.

5.8. El corto tiempo de permanencia que se dio cuando los aceros IF alcanzaron temperatura de recristalización superior a 680°C , no generó crecimientos de grano notables en estos aceros. El tamaño de grano se mantuvo entre 8 y 9.

5.9. Los análisis de varianza en la investigación fueron fundamentales, debido a que corroboró en algunos casos y en otros dio la guía para entender lo que estaba sucediendo durante la etapa de caracterización y análisis de los resultados.

6. RECOMENDACIONES

6.1. Se deben continuar con estudios que lleven a demostrar la afinidad entre el tamaño de grano sobre la elongación del punto de fluencia y buscar su relación directa con el proceso de temple del acero libre de intersticios después de ser tratado térmicamente.

6.2. Los aceros libres de intersticios, son aceros con un potencial de usos a nivel industrial bien importante, se hace necesario profundizar en su comportamiento en procesos de deformación y en procesos térmicos, con el fin de predecir de mejor manera lo que se espera en cada aplicación.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Microstructure and Texture Evolution under Strain – Path Changes in Low Carbon Interstitial Free Steel. E.U Nesterova, B. Bacron and C. Teodosiu. Metallurgical and Materials Transactions; Oct 2001; 32A; 10; Pro Quest Science Journals Pg 2527.
- [2] Efeito da Variação das Condições de Encharque nas Propriedades Mecânicas do Material IF Processado no Recozimento Continuo da Usiminas. Rodrigo Rocha de Meira, Ronaldo Barbosa; Fevereiro 2006.
- [3] Formabilidad en Aceros, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León. Rafael Colás
- [4] Orientation Imaging Microscopy Studies of Recrystallitation in Interstitial F, YYTse:B J Duggan Mar 2006, Metallurgical and Materials Transaction.
- [5] Microstructure and texture evolution under strain path changes in low carbon, E V Nesterova: B Bacroix:C teodosiu, Metallurgical and Materials Transactions, Oct 2001.
- [6] Recrystallitazation Behavior of Deep Drawing Low Carbon Steel Sheets Produced by Mobarakeh Steel Plant, B. Soleimani Amiri and G.H Akbari Deparment of Metallurgy Shahid, Abril, 2006.
- [7] Material Science, Prof. Satish V. Kailas. Dept. of Mechanical Engineering. Indian Institute of science.
- [8] Determinación del exponent “n” de endurecimiento por deformación mediante un algoritmo de minimos cuadrados ponderados, Ariel Matusevich, Reinaldo Mancini, Julio Massa, Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, Noviembre 2010.
- [9] Mechanics of Sheet Metal Forming, Z. Marciniak, J. L. Duncan, S. J. Hu, 2002
- [10] A Rolling – Annealing Cycle For Enhanced Deep Drawing Properties in Interstitial Free Steels, M. Z. Quandk, K. T. Lam and B. J. Duggan, Department of Mechanical Engineering, The University of Hong Kong.

- [11] Optimización del Proceso de Recocido de Recristalización para Obtener los Grados de Dureza y Resistencia Requeridos por el Acero para Estañar y Cromar, Humberto Gómez, Jaime Torres, Universidad del Norte, 2002.
- [12] Effect of annealing time on solute carbon in ultralow-carbon Ti-V and Ti-Nb steels
Waleed Al-Shalfan, John G. Speer, David K. Matlock and Kip Findley
- [13] Yield Point Elongation In Surface Critical Steels, Dr. John G. Speer Dr. David K. Matlock Mr. Bryce Lakamp Dr. Rongjie Song, mayo 30 2007.
- [14] LUDERS BAND FORMATION IN STEEL, Mike Meier, Aaron Broumas, Octubre 9 de 2001 Department of Chemical Engineering and Materials Science University of California.